

土 木 研 究 所 資 料

護岸法覆工の水理設計法に関する研究

昭和63年4月

建設省土木研究所
河川部河川研究室

Copyright ©1988 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

護岸法覆工の水理設計法に関する研究

河川研究室 室 長 福岡 捷 二
研究員 藤 田 光 一
研究員 森 田 克 史

要 旨

風洞実験により、洪水時に護岸法覆工に作用する力と法覆工表面近傍の流速を調べ、その結果より、護岸法覆工形状・流速と護岸法覆工に作用する力との関係、法覆工表面の粗度形状と流速低減効果との一般的な関係を明らかにした。その結果に基づき、流水中において安定であり、かつ適度な流速低減効果を持つ護岸法覆工を設計する方法を提案した。

キーワード：護岸工，法覆工，河川構造物，水理設計法，流体力，相当粗度

目 次

第 1 章	序 論	1
1. 1	研究の目的	1
1. 2	研究の概要	1
第 2 章	風洞実験による護岸法覆工の水理特性把握手法	2
2. 1	風洞実験の基本的な考え方	2
2. 2	風洞実験で得られた水理量を現地の水理量に換算する方法	3
2. 3	風洞実験の方法	4
第 3 章	護岸ブロックに作用する流体力の特性	9
3. 1	概 要	9
3. 2	実験方法	9
3. 3	風速分布	13
3. 4	流れに平行に設置されたブロックに作用する流体力の特性	15
3. 5	流向と平行でないブロックに作用する流体力の特性	21
3. 6	最上流端ブロックの下が洗掘された場合の流体力の特性	25
3. 7	ブロックに作用する流体力の作用線	27
第 4 章	流水中に置かれたブロックの安定性	31
4. 1	概 要	31
4. 2	流水中でのブロックの安定性を判定する方法	31
4. 3	ブロックの安定性	34
4. 4	ブロックが流水中で安定であるための必要重量	39
第 5 章	護岸法覆工の流速低減効果	45
5. 1	概 要	45
5. 2	流速低減効果を表す相当粗度 K_s について	45
5. 3	実験方法及び実験ケース	45
5. 4	相当粗度 K_s と粗度形状との関係	50
第 6 章	設計外力の検討	54
6. 1	概 要	54
6. 2	護岸近傍の平均的な流速 V_0 の算定法	54

6.3	設計せん断力，設計流速の算定法	56
第7章	護岸法覆工の設計法に関する検討	57
7.1	概 要	57
7.2	適度な流速低減効果を持つ護岸法覆工表面粗度の設計法	57
7.3	流水に対し安定な法覆工の設計	61
7.4	流水中で安定でありかつ適度な流速低減効果を持つ護岸法覆工の設計法	67
第8章	まとめと今後の課題	72

第 1 章 序 論

1.1 研究の目的

護岸工は、根固工や水制工とともに堤防および河岸、河床を流水による洗掘や侵食から防御するという重要な構造物である。そのため護岸工には、流水の外力に対し安定でかつ適度な流速低減効果を持つという水理機能が求められる¹⁾。現在、護岸工の基本的な構造および設計の基本的な考え方は、河川砂防技術基準(案)²⁾、河川管理施設等構造令³⁾などに述べられている。しかし、より具体的な設計項目(例えば、護岸ブロックの重量、厚さ、粗度形状など)については、施工性、経済性からの検討がなされているものの、上記の水理機能の面からの検討は各河川で主として経験に基づいて行われており、それらが必ずしも充分と言えない場合も見られる。このような状況を踏まえ、本研究は、洪水時に護岸法覆工に作用する力と護岸法覆工の持つ流速低減効果を調べ、その結果に基づき、明確な水理的根拠に基づく護岸法覆工の水理設計方法を提案しようとするものである。

1.2 研究の概要

従来より、明確な水理的根拠に基づく合理的かつ一般的な護岸工設計法の確立を目的とした研究が行われてきた。しかし、現地観測、水路実験いずれによっても洪水時の護岸工に作用する外力の把握が著しく困難であったことから、護岸法覆工の洪水時の安定性に関する研究は進んでおらず、このことが水理機能を充分考慮した護岸工設計法の確立を妨げていたと考えられる。そこで本研究では、まず、こうした問題点を解決するため、洪水流を風洞内の高風速流れで模擬し、風洞内に置かれた護岸ブロックに作用する力とその周辺の風速を測定することにより洪水時の護岸法覆工の水理特性を調べる手法について検討を行った(2章)。得られた手法を用いて、実大規模の護岸ブロックを設置し、洪水時の護岸法覆工に作用する力を調べ、護岸法覆工に作用する力とその形状・流速との関係を明らかにした(3章)。この結果に基づき、洪水時の護岸ブロックの安定性についての考察を行った(4章)。また、同じ手法により護岸法覆工の流速低減効果を調べ、既存の実験結果と合わせることで、法覆工表面の粗度形状と流速低減効果との一般的な関係を明らかにし、所定の流速低減効果を得るための護岸法覆工表面の粗度形状について検討を行った(5章)。さらに、護岸法覆工の設計外力について検討を行なった(6章)。最後に河川砂防技術基準(案)²⁾、河川管理施設等構造令³⁾などに述べられている設計指針の内容を踏まえた上で、本研究により得られた護岸法覆工の水理特性に基づき、具体的、定量的な護岸法覆工の水理設計法を提案した(7章)。

なお、本研究は、主に、河川事業調査費テーマ「堤防の安全度評価手法に関する調査(昭和59年度～63年度)」の成果から成っている。また、本研究の成果は、護岸・根固め工設計指針(案)⁴⁾に反映され、本研究の成果の主要な部分が文献5)、6)にまとめられている。

第2章 風洞実験による護岸法覆工の水理特性把握手法

2.1 風洞実験の基本的な考え方

洪水中に護岸法覆工の水理特性、例えば流水から受ける力や周辺の流速分布を観測することは極めて困難であることから、多くの場合、護岸法覆工の水理特性を把握するために実験が行われる。実験が実際の現象を再現しているかどうかは、 R_e 〔レイノルズ数〕と F_r 〔フルード数〕という2つの無次元の水理量に基づき判断することができる。これら2つの無次元量は、それぞれ下式で表される。

$$R_e = \frac{u \cdot l_b}{\nu} \quad (2-1)$$

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{g h}} \quad (2-2)$$

ここで、 u ：流速、 l_b ：代表長さ（ここでは、護岸ブロックの代表スケールを取る）、 ν ：動粘性係数、 g ：重力加速度、 h ：水深、である。現地と実験で両方の無次元量が一致すれば、実験が現地の現象を再現していることになる。水路実験においては、 F_r を現地と模型で合せることは容易であるが、 R_e を合せることは不可能である。これは、(2-1)式からわかるように、 R_e を合せるためには〔流速×スケール〕を現地と模型で同じにしなければならず、これを通常の水路実験で達成することが不可能であるからである。このため、通常の水路実験では、現地の R_e に対する実験の R_e の比が最大でも1/30程度以下となる。設計指針を検討するために必要となる護岸法覆工に作用する力やその近傍の流速は R_e に強く支配されるため、実験と現地で F_r だけが一致し、 R_e が大きく異なる条件で行われた水路実験からは、必ずしも有効な結果を得ることはできない。

そこで本研究では、洪水流を空気の流れて模擬する風洞実験により護岸工の水理特性を調べることとした。空気の ν は、水の ν よりも10～15倍大きいが、風洞実験では、実物大の護岸ブロックを用いた実験を行うことができ、また現地の洪水流の流速よりもはるかに大きい風速（本研究で用いた風洞では最大25 m/s）を起こすことができるので、現地と実験の R_e をほぼ一致させることができる。一方、現地が自由表面を持つのに対して、風洞内の気流は周囲を壁で囲まれ自由表面を持たないため、水深 h や重力加速度 g など自由表面に関係する水理量からなる F_r に関しては、風洞実験により現地を再現することは不可能となる。しかし、護岸工の設計法を検討するに当たって最も重要なのは、流速が大きく流れから強い力を受ける最深部周辺の護岸法覆工に関する水理特性であり、深い部分の水理現象は自由表面の影響をほとんど受けない。以上のことから、本研究で対象とする深い位置にある護岸ブロックについては、風洞実験によって、洪水中の水理特性を高い精度で求めることができる。

2.2 風洞実験で得られた水理量を現地の水理量に換算する方法

2.2.1 護岸に作用する力

護岸ブロックに作用する力は、抗力 D 、揚力 L に分けられる。(図2-1) これらの力是一般に次のように表すことができる。

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot A_D \cdot C_D \cdot u^2 \quad (2-3)$$

$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot A_L \cdot C_L \cdot u^2 \quad (2-4)$$

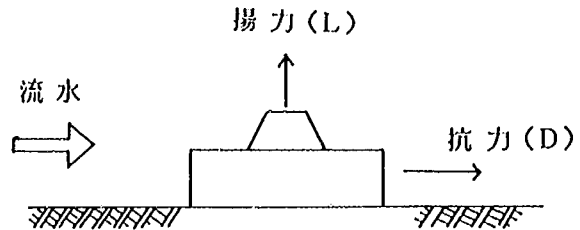


図2-1 護岸ブロックに作用する力

ここで、 u ：護岸近傍の代表流速、 ρ ：水の密度、 A_D 、 A_L ：それぞれ抗力、揚力が作用する方向のブロック1個の投影面積、 C_D 、 C_L ：それぞれ抗力、揚力係数、である。 C_D 、 C_L の一般的特性を明らかにすれば、ブロックの投影面積と代表流速 u からブロックに作用する力を求めることが可能となる。一方、物体に作用する流体力については、自由表面の存在を無視できる場合、次式が一般的に成立する。

$$f \{ \Delta p / (\rho_f \cdot u^2), R_e \} = 0 \quad (2-5)$$

ここで、 Δp は圧力差、 R_e はレイノルズ数、 ρ_f は流体の密度である。上式()内の $\Delta p / (\rho_f \cdot u^2)$ は(2-3)、(2-4)式の C_D 、 C_L に相当するものである。したがって、 R_e が実物と同じであれば、ブロックの大きさや流体の種類が異なっても実物と同じ C_D 、 C_L を求めることができる。そこで、本研究では、実物と R_e の領域が同じになるような風洞実験により、護岸ブロック模型に作用する力と流速を測定し、その結果から抗力、揚力係数 C_D 、 C_L を求める(3章)。これより流水中の護岸ブロックに作用する力を求め、それに基づいて護岸ブロックの安定性について検討を行う(4章)。

2.2.2 流速

水面の影響が及ばない深い位置にある護岸工近傍の流速分布は、下式で表される対数分布則に従うと考えられる。

$$u/u_* = 8.5 + 5.75 \cdot \log_{10} \{ (y - y_0) / K_s \} \quad (2-6)$$

ここで、 y ：護岸工表面からの距離、 y_0 ：護岸工表面から対数則の原点位置までの距離、 u ：護岸工表面から y 離れた位置の流速、 u_* ：摩擦速度 $\{ (\tau \text{ (せん断力)} / \rho)^{1/2} \}$ 、 K_s ：相当粗度である。上式からわかるように、相当粗度 K_s がわかれば、摩擦速度 u_* が与えられたときに流速分布を知ることができ、護岸法覆工表面の粗度が持つ流速低減効果についての定量的な検討を行うことができる。相当粗度 K_s と護岸法覆工表面の形状との関係は、風洞実験によっても求めることができる。そこで、本風洞実験により、種々の護岸法覆工表面の形状と相

当粗度 K_s との関係进行明らかにし、その結果に基づいて、護岸法覆工表面の粗度が持つ流速低減効果についての定量的な検討を行う（5章）

2.3 風洞実験の方法

2.3.1 風洞の概要

実験では、土木研究所耐風工学実験施設内のフラッター風洞（以下“ A風洞 ”と呼ぶ）と非定常空気力風洞（以下“ B風洞 ”と呼ぶ）を使用した。各風洞の諸元を表 2 - 1 に示す。

表 2 - 1 風洞測定部の諸元

	A 風 洞	B 風 洞
高 さ (m)	4.0	2.0
巾 (m)	2.5	1.0
長 さ (m)	10.0	3.0
ブロック模型取付け場所	底 面	側 壁
最大風速 (m/s)	25	30

2.3.2 計測方法

風洞実験では、空気の流れを外力として用いる。空気は水に比較してその単位体積重量が非常に小さいため、重力の効果（浮力の影響）を無視することができる。このため、ブロック模型を底面でなく側壁に取付けても抗力や揚力などの流体力を直接測定することができる。そこで、実物大の護岸ブロック模型を、測定の実行やすさに応じて風洞の底面あるいは側壁に取り付け、そのブロック模型に作用する力とその近傍の流速を測定した。ブロック模型に作用する流体力の計測は、4分力検出器（一部3分力検出器）を用いて行った。4分力検出器の性能を表 2 - 2 に示す。検出器の最大出力に比べて計測する力が非常に小さいため、実験に先立ち、0 kg ～ 5 kg までの計測値の直線性を確認し計測の精度に問題がないことを確認した。模型および検出器の A, B 風洞への取り付け状況を図 2 - 2, 2 - 3 に示す。いずれの風洞でも、4分力検出器は風洞の外へ固定した。このため、ブロック模型が風洞側壁に直接取り付けられた B 風洞では、ブロック模型と検出器をつなぐ棒を風洞側壁に通すことになる。このため、通風時に、風洞内外の圧力差によって、風洞側壁にあけられた穴を通して空気が流れ、ブロック模型の底面が風洞内の圧力でなく大気圧近くになり、揚力に関する計測値に誤差が生じる恐れがある。これを防ぐため、図 2 - 3 に示すように検出器と風洞側壁の間をシールドすることにより検出器内の空気を風洞外の空気と完全に隔離し、両者の間に入り出りがないような処置を行った。さらに、風洞内外および検出器内の圧力を計測し、空気もれがないことを確認しながら実験を行った。なお、A 風洞では、図 2 - 2 のように風洞床と模型を設置する仮設床との間に約

表 2 - 2 4 分力検出器概略仕様

定 格 負 荷	$F_x \pm 30 \text{ kg}$ $F_y \pm 30 \text{ kg}$ $F_z \pm 30 \text{ kg}$ $M_y \pm 15 \text{ kg-m}$
定 格 出 力	各分力共 約 1000×10^{-6}
非 直 線 性	各分力共 $\pm 0.5 \% \text{ F.S}$
ヒステリシス	各分力共 $\pm 0.5 \% \text{ F.S}$
許 容 過 負 荷	各分力共 $150 \% \text{ F.S}$
干 渉 度	(イ) 計測各分力間 $\pm 0.3 \% \text{ F.S / F.S}$ (ロ) $M_x = 12 \text{ kg-m}$ $M_z = 6 \text{ kg-m}$ による干渉度 各分力共 $3 \% \text{ F.S}$
零点の温度影響	各分力共 $\pm 0.01 \% \text{ F.S / } ^\circ\text{C}$
感度の温度影響	各分力共 $\pm 0.05 \% \text{ Reading / } ^\circ\text{C}$

F_x, F_y, F_z : それぞれ x, y, z 方向の力, M_y : y 軸を軸とする
モーメント

x, y, z : 直交座標

45 cm 程の距離があり、仮設床上下には圧力差がほとんどないため、仮設床に明けられた穴を通しての空気流はほとんどない。このことから、B 風洞で行ったような処置は施さなかった。しかし、ブロック取り付け用の棒と仮設床、風洞床との隙間を接触しない範囲で極力小さくし（1～2 mm 程度）、空気の入りが生じにくいようにした。

実験では、法面に置かれた実際の護岸ブロックを想定して、写真 2 - 1 に示すようにブロック模型を風洞底面（A 風洞）あるいは側壁（B 風洞）に置き、その中の模型 1 個に作用する力を計測する。力を計測するためのブロック模型は、検出器のセンサーを除いていかなる物体とも接触してはならないが、周囲のブロックや風洞側壁あるいは底面と離れすぎると、得られる計測値が実際の値と異なってしまう。本実験では、検力用ブロック模型と風洞側壁、底面や隣り合うブロックとの距離が接触しない範囲で極力小さく（2 mm 以下）なるようにブロック模型の取り付けを行った。また、検力用ブロックの位置を風洞内で変えることは困難であることから、敷き詰めたブロック群内の様々な位置に作用する力の計測は、検力用ブロックの位置を変えずに周囲ブロックの配置をずらすことにより行った。

力の測定は、検力計からの出力をペン書きオシロに記録し、その波形から平均値を読取ることにより行った。したがって、本資料において示す力の計測値はすべて平均値である。

風洞内の風速は、デジタル精密微差圧計に接続されたピトー管を用いて計測した。

実験は、風洞内中心部の流速が 10～25 m/s となる条件で行った。

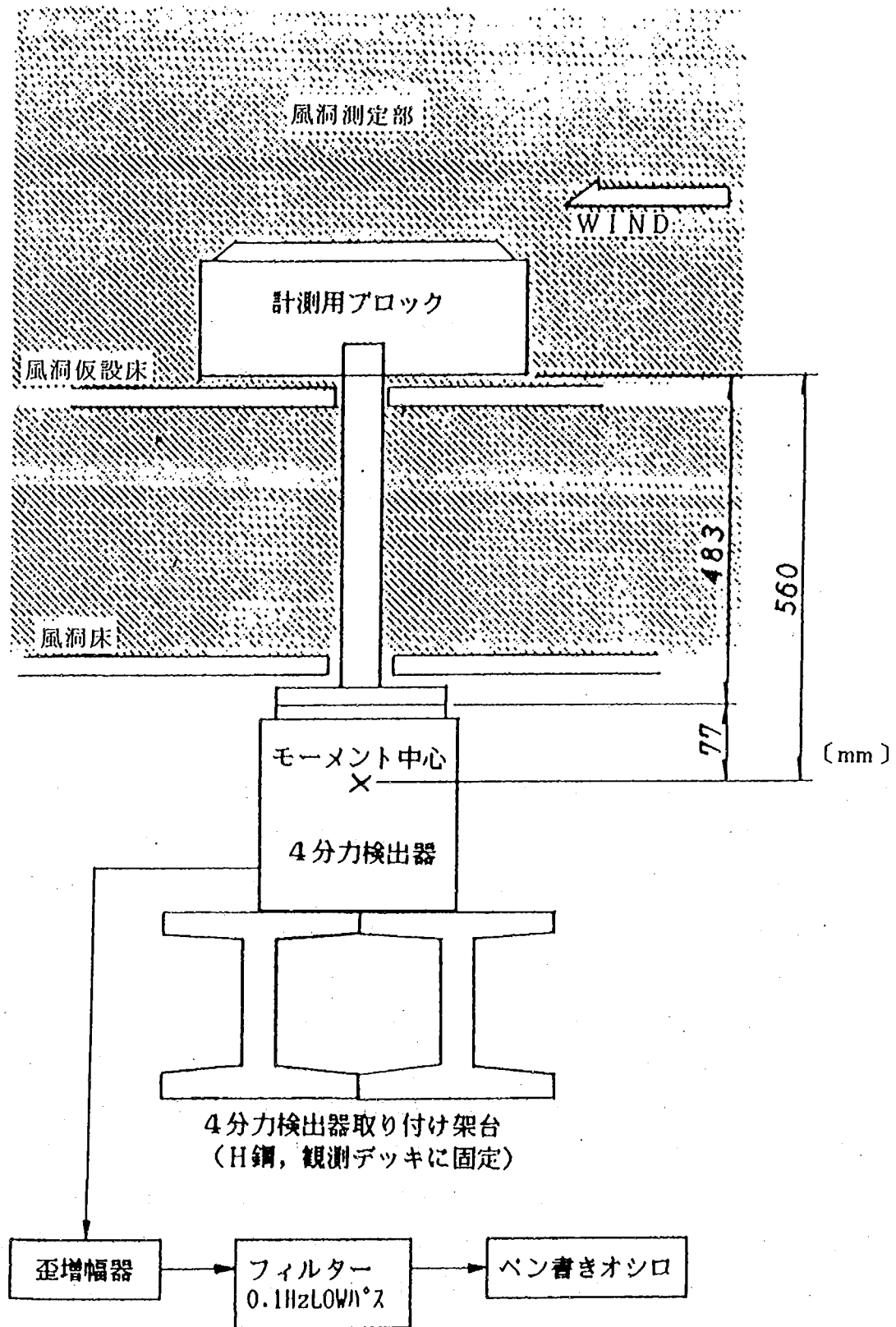


図 2 - 2 流体力計測方法 (A 風洞)

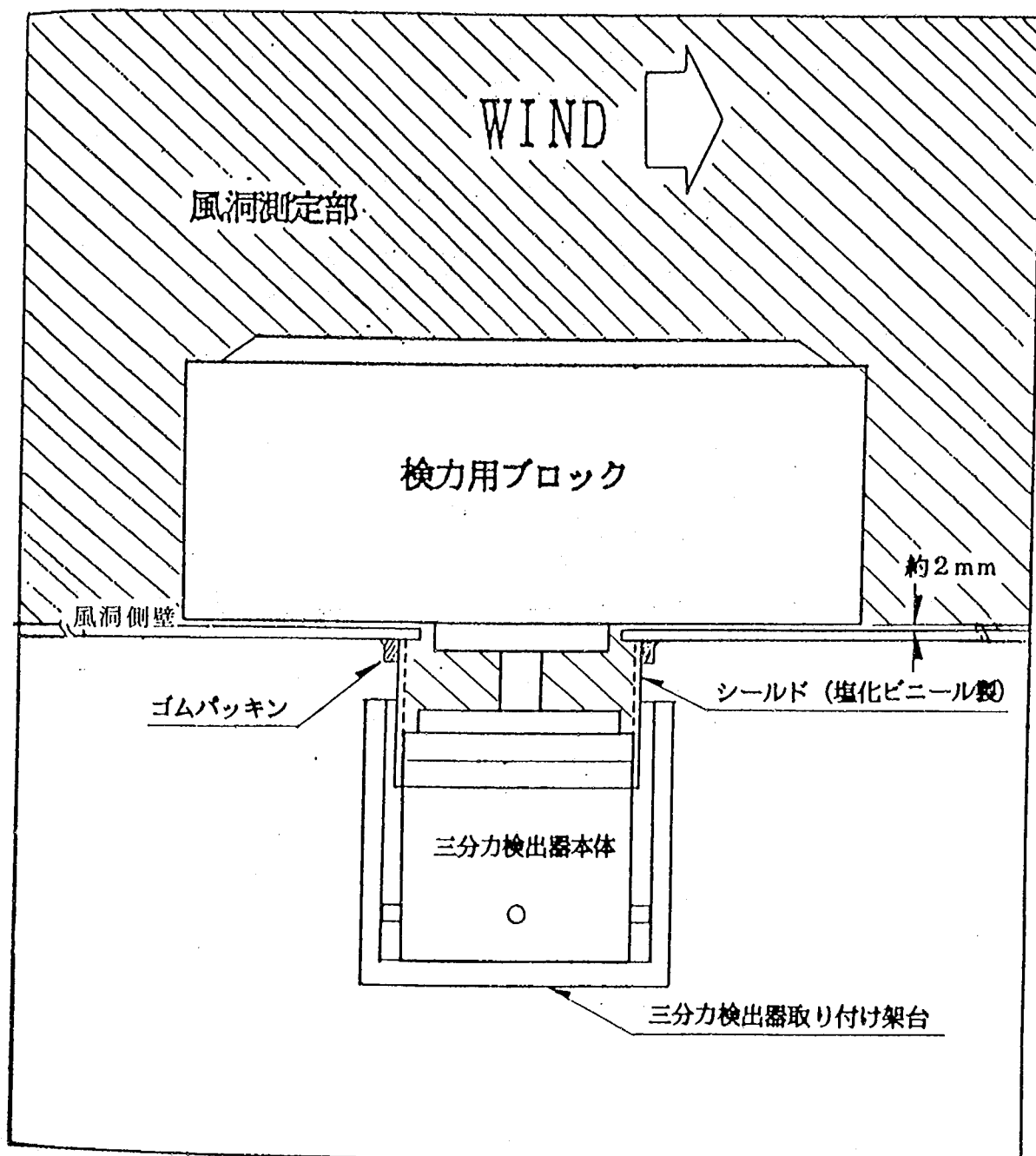


図 2 - 3 流体力計測方法 (B 風洞)

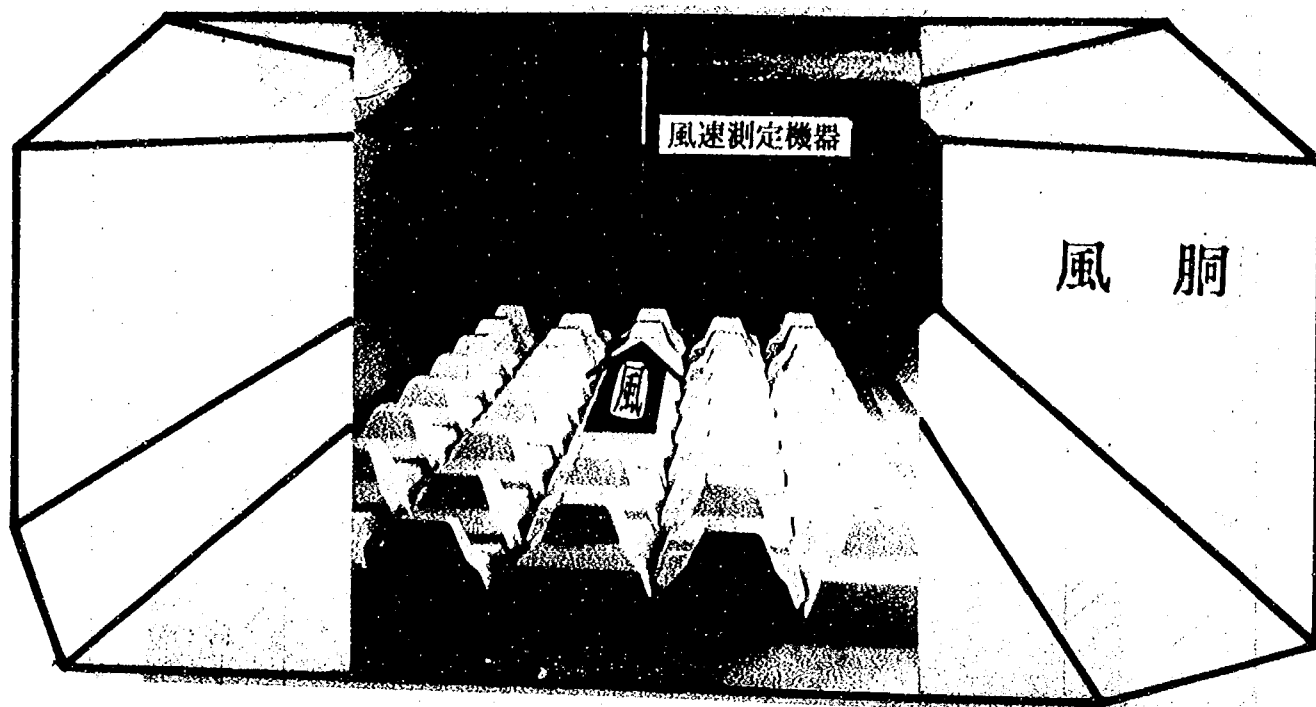


写真 2 - 1 風洞内に護岸ブロック模型を設置した状況
(設置されたブロックのうち1個が、風洞外
側の4分力検出器に取り付けられている)

第3章 護岸ブロックに作用する流体力の特性

3.1 概 要

代表的な護岸法覆工ブロックを2種類選定し、それらの模型を風洞内に設置して実験を行うことにより、護岸ブロックに作用する流体力の特性を調べた。

3.2 実験方法

3.2.1 ブロック模型

実験に使用した2種類のブロック模型A, Bの形状を図3-1に示す。ブロックAは連接ブロックに用いられるものである。ブロックBは標準的な張ブロックである。実際の施工では、ブロックAは鉄筋により連接され、ブロックBについては各ブロック間のすき間にモルタルで目地が施工される。しかし、実験の目的がブロックに作用する力を測定することにあることから、実験においてはこのような処置は施していない。

模型の縮尺は、実験と実河川とのR。 $[\text{レイノルズ数}]$ のオーダーが合うように、なるべく原寸に近い値とした。すなわち、ブロックAはモデルとした実際のブロックの $1/1.25$ 、ブロックBは $1/1.2$ の大きさを持つ。また、模型を軽量とするため、ブロックAはABS樹脂、ブロックBは厚さ5mmの合板で製作した。模型が実際と同じようにコンクリートで造られた場合の重量は、ブロックAが23.55kg、ブロックBが26.04kgとなる。

実験では、B風洞を用い、流体力の計測には3分力検出器を使用した。通風した流速は、各実験とも風洞中心で10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25 m/sとした。

3.2.2 実験ケース

実験ケースの一覧表を表3-1に、模型の配列図を図3-2-1~3-2-5に示す。ブロック模型の配列方法は、大きく以下の2通りに分けられる。

① ブロック模型1個を単独で設置する(以後、単体と呼ぶ)

図3-2-1, 3-2-3のように検力用ブロック1個だけを風洞側壁へ設置する配列方法である。

② 同じ形状を持つブロックを敷き詰める(以後、ブロック群と呼ぶ)

図3-2-2, 3-2-4に示すように検力用ブロックの周囲にも、同じ形状のブロック模型を密に敷き詰め、実際の護岸法覆工ブロックと同じ状況を再現するものである。実験では、ブロック群の最先端位置からの距離Xの異なる種々の位置にあるブロックに作用する力を測定した。

また、実験においては、図3-2-1, 3-2-2のようにブロックを流れに平行に設置した条件の他に、図3-2-3, 3-2-4のように流れに対して角度 β を持つように設置した場合についても検討を行った。これは、湾曲部において2次流が発達し、流向が河道法線に対して角度を持つ状況を想定したためである。さらに、図3-2-5に示すように、ブロック群

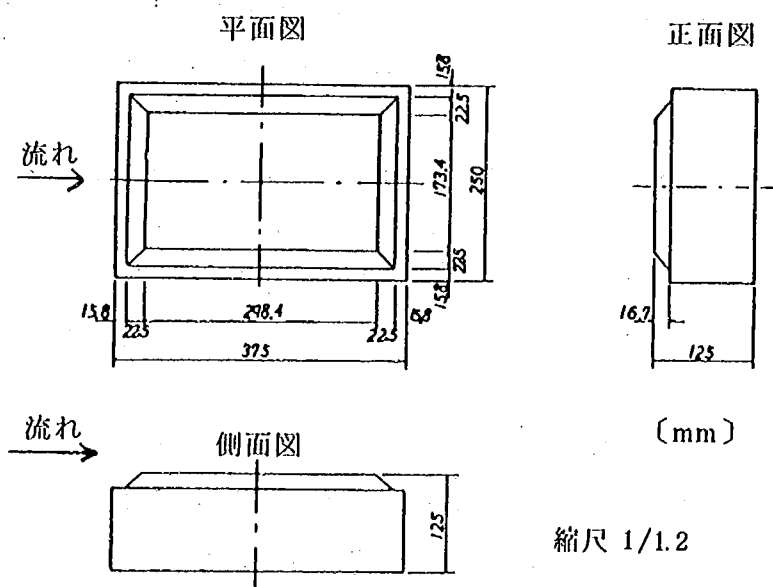
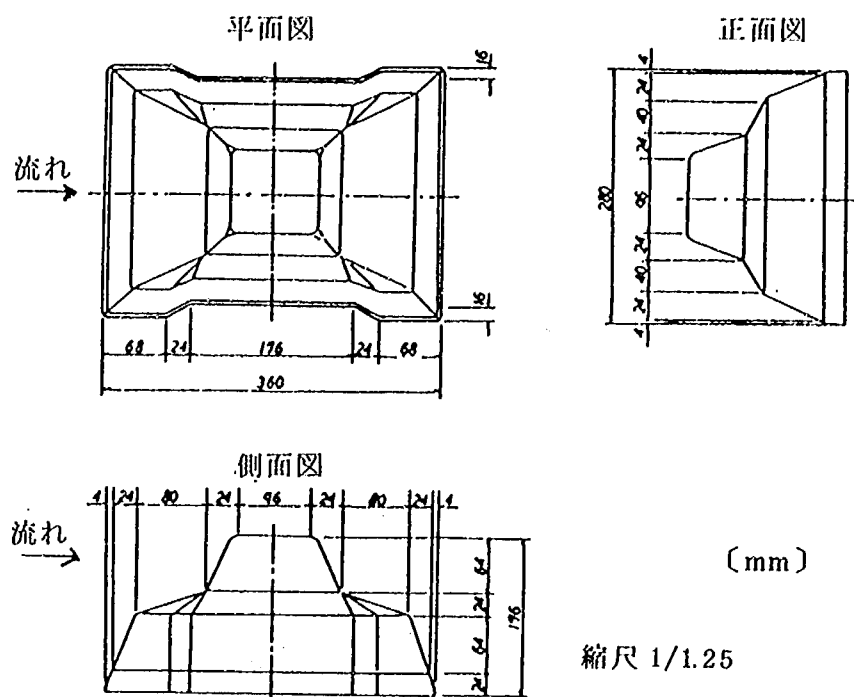


図 3-1 ブロック模型

表 3 - 1 実験ケース一覧表

Case No	ブロック形状	配 列	角度 θ (deg)	X (m)	備 考
予 備	無 し	—	—	—	
I - 1 - 1	A	単 体	0	0.000	
I - 1 - 2	A	ブロック群	0	0.000	
I - 1 - 3	A	"	0	0.360	
I - 1 - 4	A	"	0	0.720	
I - 1 - 5	A	"	0	1.440	
I - 2 - 1	B	単 体	0	0.000	
I - 2 - 2	B	ブロック群	0	0.000	
I - 2 - 3	B	"	0	0.375	
I - 2 - 4	B	"	0	1.500	
I - 2 - 5	B	"	0	1.540	ブロック間に 10 mm のすき間をあける。
I - 3 - 1	A	単 体	10	0.000	
I - 3 - 2	A	"	20	0.000	
I - 3 - 3	A	ブロック群	20	0.000	
I - 3 - 4	A	"	20	1.620	
I - 4 - 1	B	単 体	10	0.000	
I - 4 - 2	B	"	20	0.000	
I - 4 - 3	B	ブロック群	20	0.000	
I - 4 - 4	B	"	20	1.500	
I - 5 - 1	A	"	0	0.000	迎角 $\alpha = 20^\circ$
I - 5 - 2	A	"	0	0.000	壁面との隙間 $d = 30 \text{ mm}$
I - 5 - 3	A	"	0	0.000	壁面との隙間 $d = 60 \text{ mm}$
I - 5 - 4	A	"	0	0.000	壁面との隙間 $d = 123 \text{ mm}$

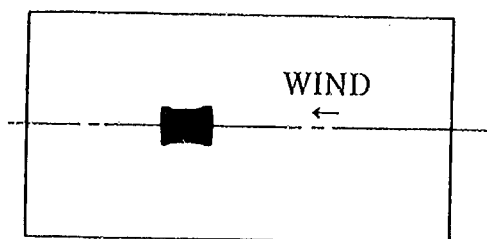


図 3-2-1 模型配列図 (単体)

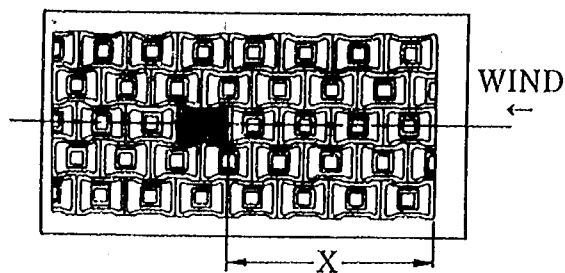


図 3-2-2 模型配列図 (ブロック群)

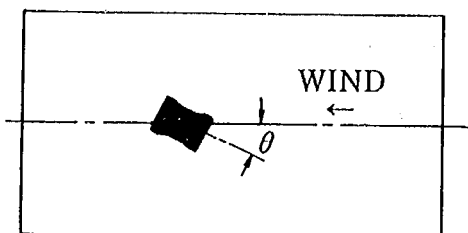


図 3-2-3 模型配列図 (単体角度付)

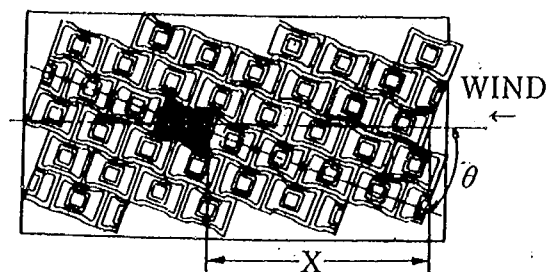


図 3-2-4 模型配列図
(ブロック群, 角度付)

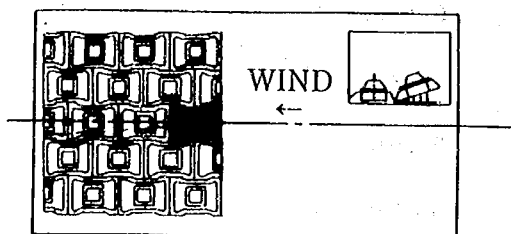


図 3-2-5 模型配列図
(最上流端ブロック下が洗掘)
(を受けた状況に相当する)

☆ 黒いブロックが検力用である。

図 3-2 ブロック模型配列図

最上流端位置にあるブロックに関して、迎角をつけたり、風洞側面とブロック模型底面にすき間を開けた状態で、そのブロックに作用する力を計測した。この実験は、ブロック群最上流端にあるブロックの下が洗掘され空洞ができた状況を近似的に再現することを目的としたものである。

3.3 風速分布

図3-3に、ブロック模型がない場合の検力用ブロック設置位置での風速分布を示す。図からわかるように、A、Bブロックともその天端位置での風速は風洞中心流速になっている。図3-4、図3-5には、それぞれブロックA及びBが流れに平行に敷き詰められた場合の各位置における風速分布が示されている。図より、Xが大きくなるにしたがってブロック模型近傍の流速が減少しており、突起を持ったブロック群上を空気が流下することによりその近傍の流速が低減することがわかる。X = 0 m、すなわちブロック群最上流端での流速分布には、ブロック近くの流速が風洞中心流速より大きくなるなど、流れがこの位置でブロックに乗り上げるものの影響が強く現れているが、X = 1.5 m 近くなると、こうした影響はなくなり、ブロックから離れるにしたがい流速が一様に増加するという流速分布を示すようになる。

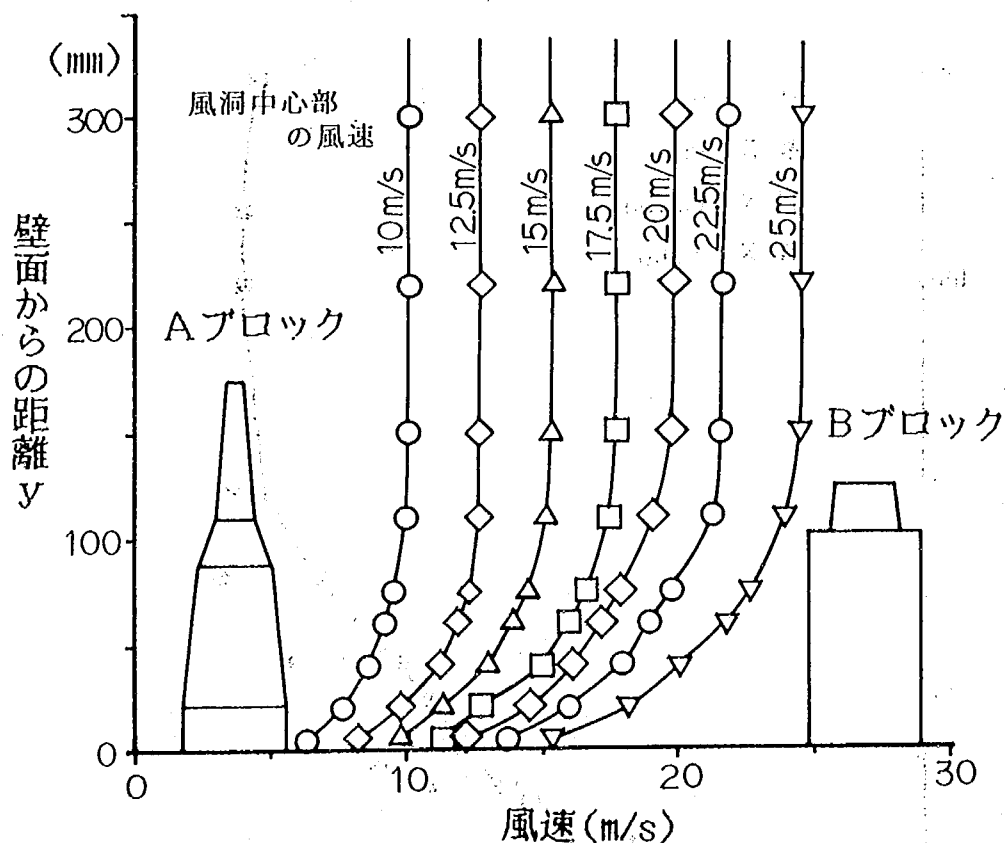


図3-3 検力用ブロック設置位置での接近流速分布

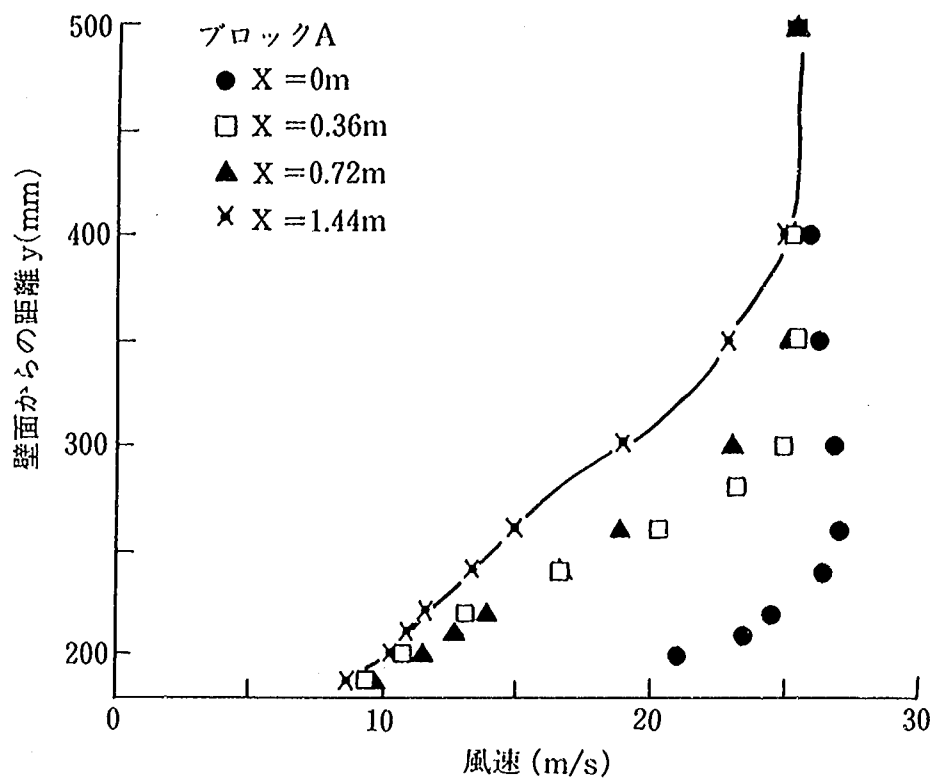


図 3 - 4 流れと平行に敷きつめられたブロック A 上の風速分布 (風洞中心流速 25 m/s)

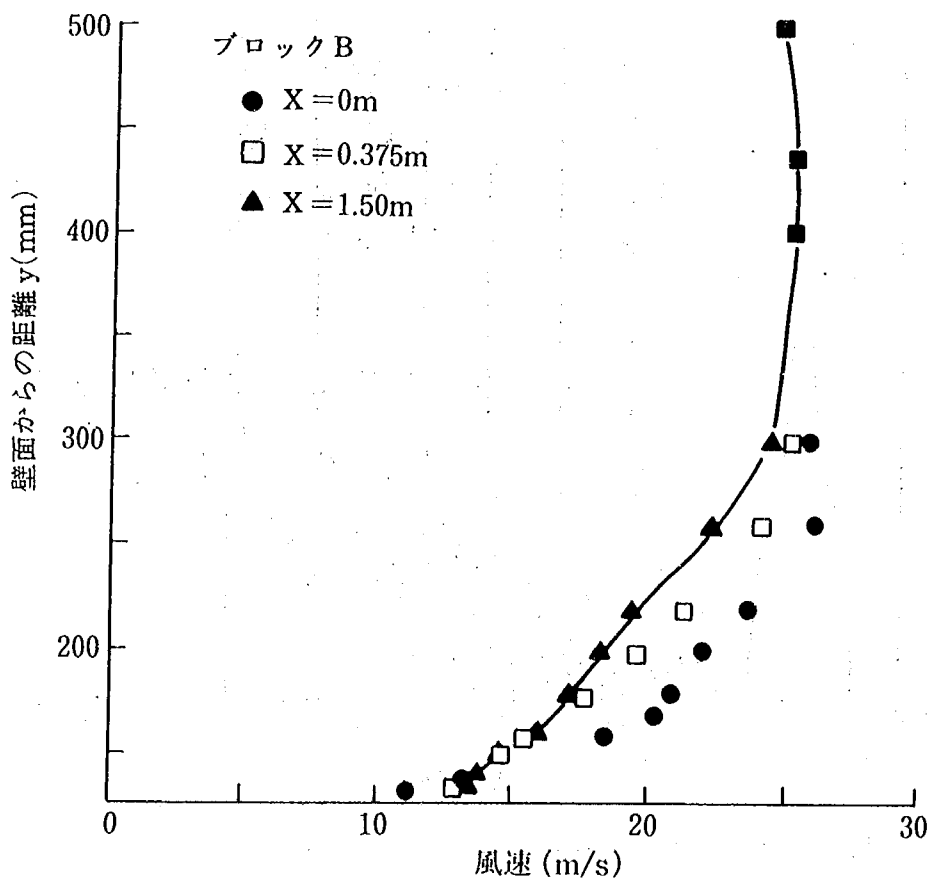


図 3 - 5 流れと平行に敷きつめられたブロック B 上の風速分布 (風洞中心流速 25 m/s)

3.4 流れに平行に設置されたブロックに作用する流体力の特性

3.4.1 流体力

図3-6は、単体で置かれたブロックと、敷き詰められたブロック群内の種々の位置のブロックに作用する力を風洞中心流速25 m/sの場合について示したものである。図中のXは、力を計測しているブロックの上流端面とブロック群最上流端との距離を表わす。(図3-2-2参照)図3-6より、Xが大きくなると抗力、揚力とも急激に小さくなり、最上流端より3個目のブロックに相当する $X = 0.7$ m以上ではほぼ一定になることがわかる。このことは、ブロック同士の遮へい効果とブロックの粗度による護岸近傍流速の減速効果が最上流端から短い距離で現れることを示している。また、これらの効果が卓越している領域では、抗力が揚力に対して無視できるほど小さい。次に、ブロック群の最上流端ブロックと単独で置かれたブロックとを比較すると、抗力については単体の方がやや大きいものの、揚力については最上流端ブロックの値が単体の2倍以上に達している。これは、ブロック群最上流端部の形状が2次元であるため、最上流端ブロック群上で流れが横に回り込めず、このため流速が単体ブロック上の流速よりも大きくなり負圧も大きくなるからである。以上より、揚力が抗力と同等あるいはそれ以上の大きさを持つこと、またブロック群最上流端に特に大きな揚力が作用することがわか

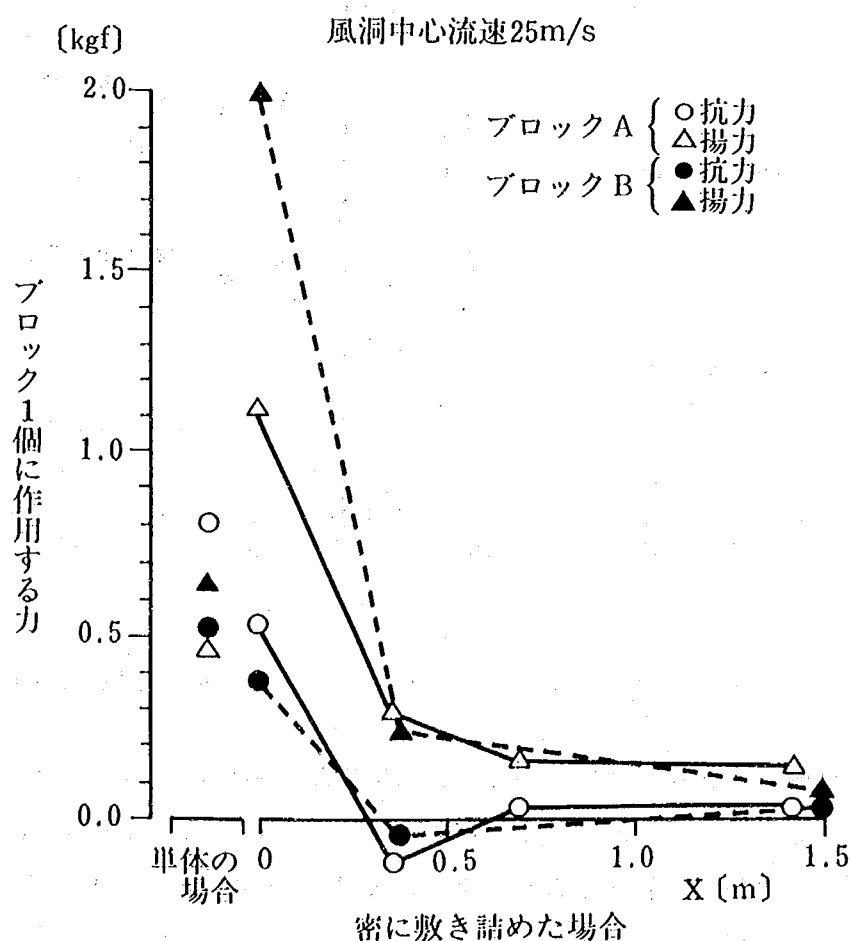


図3-6 流れに平行に設置されたブロックに作用する流体力

った。

3.4.2 抗力, 揚力係数

図3-7, 3-8に, 単体ブロックと最上流端ブロックの C_D , C_L を示す。 C_D , C_L の計算に用いる代表流速には, ブロック最上部位位置の接近流速にほぼ等しい風洞中心部の流速を用い, 投影面積には, ブロック全体から計算したものをを用いている。また図の横軸は, ブロック底面の流れ方向の長さを代表長さとして用い, 上記の代表流速を用いて計算したレイノルズ数 R_e であり, R_e の実験範囲は河川流速0.8~2.0 m/sに対応する。図に示される通り, 最上流端ブロックでは, 単体に比べ C_D がやや小さくなり, C_L が2倍以上になる。また, C_D , C_L の R_e による変化は小さく, 実河川の R_e が C_D , C_L を一定とみなせる領域に入っていることがわかる。したがって, 河川の流速が2 m/sを越えても, ここで得られた C_D , C_L 値に大きな変化はないと考えられる。

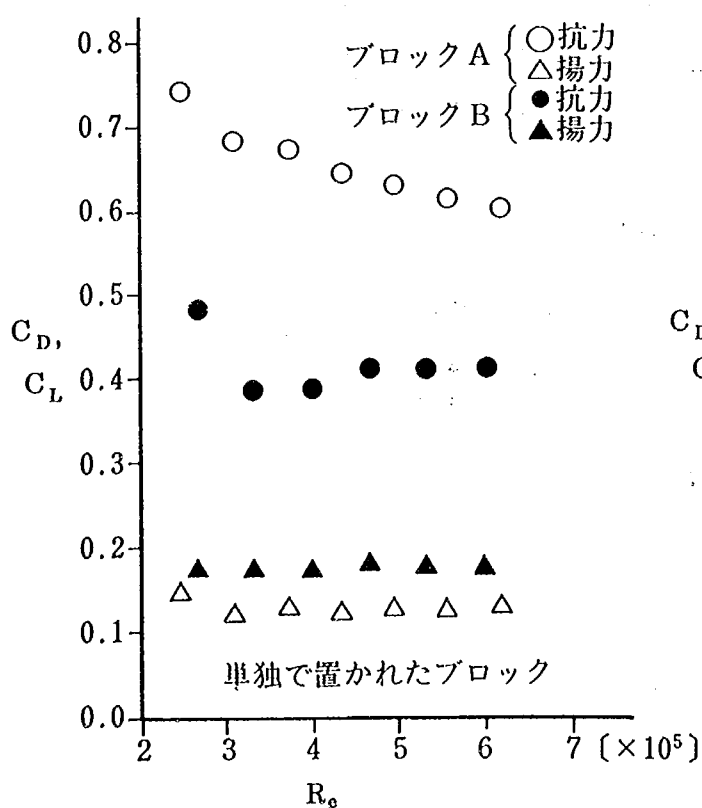


図3-7 単体ブロックの C_D , C_L

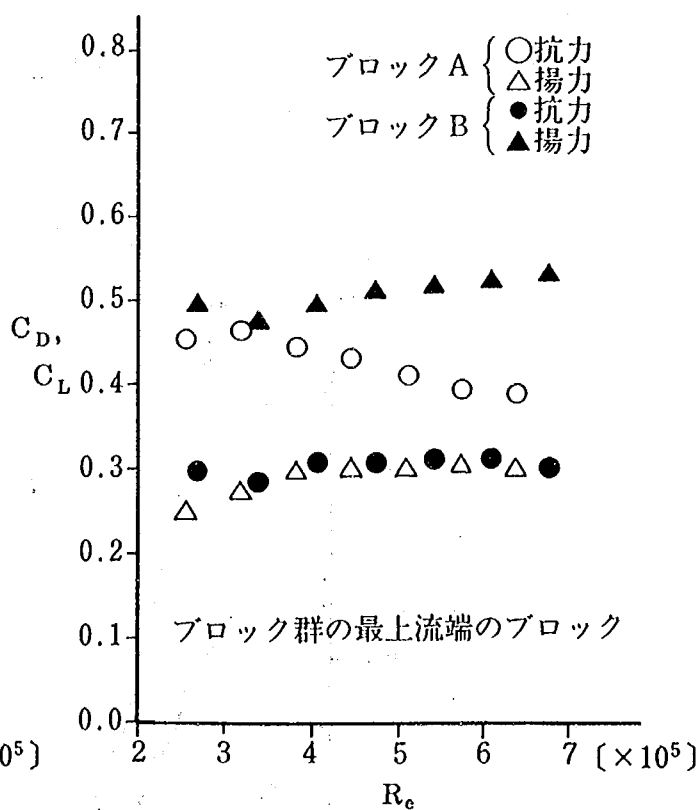


図3-8 ブロック群最上流端ブロックの C_D , C_L

一方ブロック群内部のブロックについては, 遮蔽効果と粗度による減速効果によって実質的な投影面積や代表流速が単体および最上流端ブロックの場合と大きく異なる。このため, 水理的に意味のある, すなわち一般性を有し, 実河川の R_e の範囲において C_D , C_L や投影面積が変化しないような投影面積と代表流速の与え方を検討する必要がある。そこで次のような検討を行った。まず, 測定された抗力 D から下式により摩擦速度 u_* を求める。

$$u_* = (D / \rho A_b)^{1/2} \quad (3-1)$$

ここで、 A_b ：真上から見たブロック1個の面積である。一方、護岸近傍の流速分布については、下式に示す対数則が成立する。

$$u = 8.5 u_* + 5.75 u_* \cdot \log_{10} \{ (y - y_0) / K_s \} \quad (3-2)$$

ここで、 u ：ブロックが置かれた壁面からの距離 y での流速、 y_0 ：対数則の原点位置、 K_s ：相当粗度である。上式より、 y_0 がわかれば、対数グラフにプロットした流速分布の実験値の傾きが $5.75 u_*$ に等しいことから u_* を求めることができる。そこで、(3-1)式から得られた u_* と、流速分布に(3-2)式の対数則を当てはめることにより得られる摩擦速度 u_* とが一致するように対数則の原点位置を求め、それに基づき相当粗度 K_s を算定する。図3-9はその1例であり、 $X = 1.5 \text{ m}$ のAブロックについて、原点位置 y_0 を変えてプロット

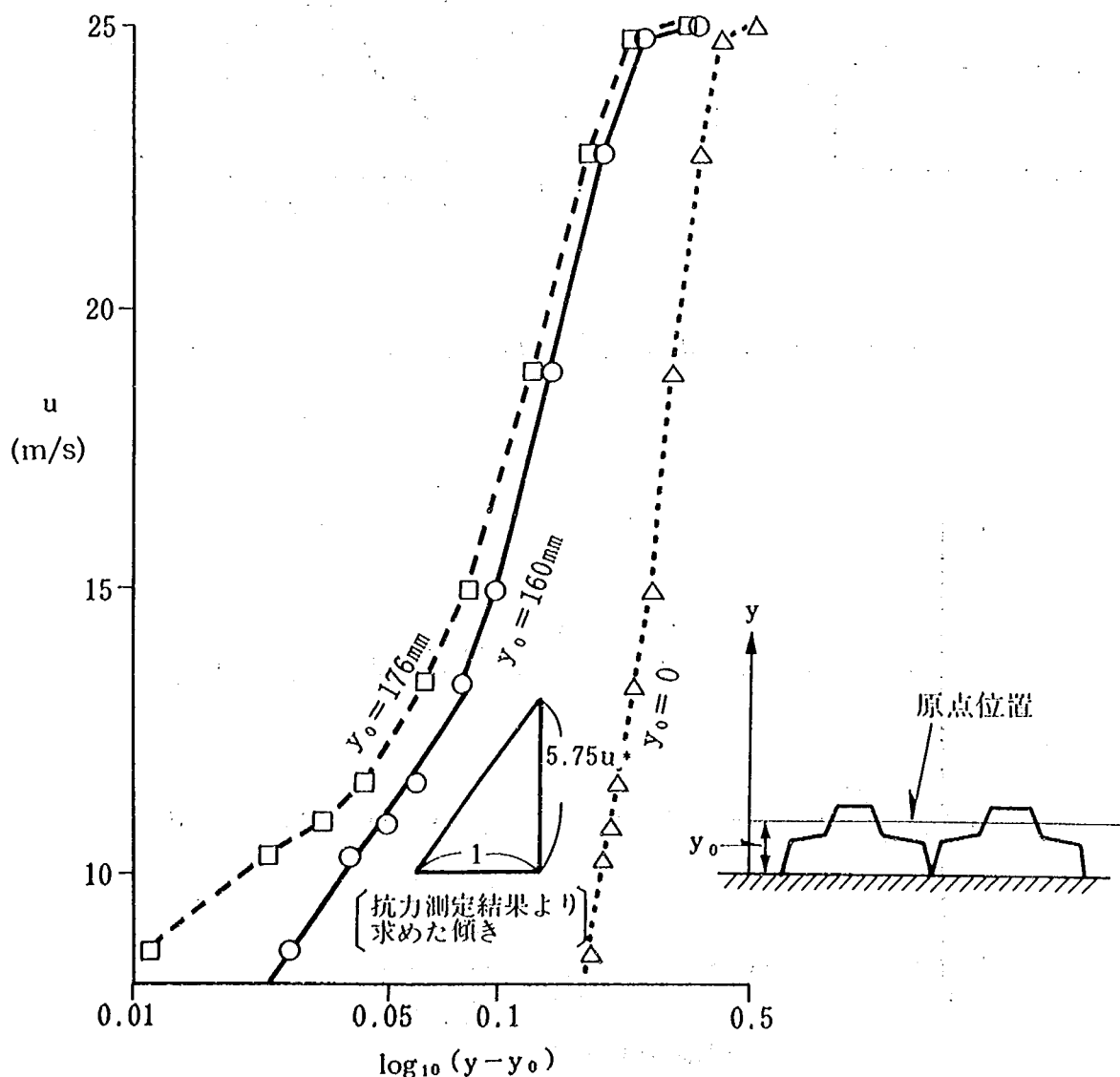


図3-9 y_0 を求める方法(ブロックA, $X = 1.5 \text{ m}$)

された流速分布の実験値と、抗力Dより(3-1)式を用いて得られる u_* に基づく $u \sim \log_{10}(y - y_0)$ グラフの傾き $5.75 u_*$ が示されている。図から、 $y_0 = 160 \text{ mm}$ の場合に、底面付近の流速分布の傾きが抗力Dから求めた傾き $5.75 u_*$ によく一致することがわかる。以上の検討を他の風速及びBブロックの実験結果についても行ったところ、図3-10に示すようにAブロックの y_0 が 160 mm 、Bブロックが 108.3 mm であり、いずれも風速によって変化しないことがわかった。また K_s も図3-11に示すようにほぼ一定であることがわかった。流体により力を受けるのはこの原点位置より上であることから、投影面積はこの部分のブロック面積(図3-10の斜線で示した部分)から計算する。次に、代表流速の取り方について検討する。流体力を(2-3)、(2-4)式から算定する際の代表流速については、吉川ら⁷⁾と同様に、Euler相似が成立するように、すなわち C_D 、 C_L が R_0 によって変化しないように代表流速を

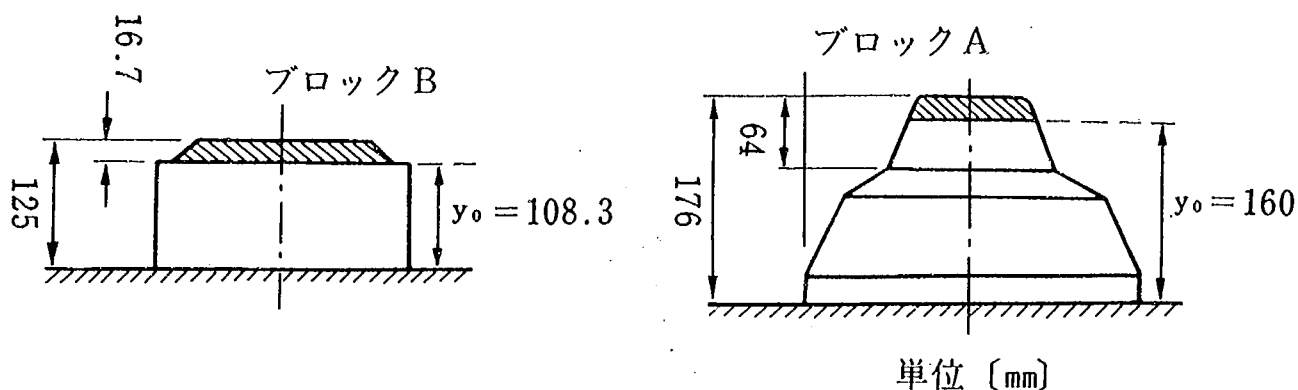


図3-10 原点位置 y_0 および投影面積算定範囲

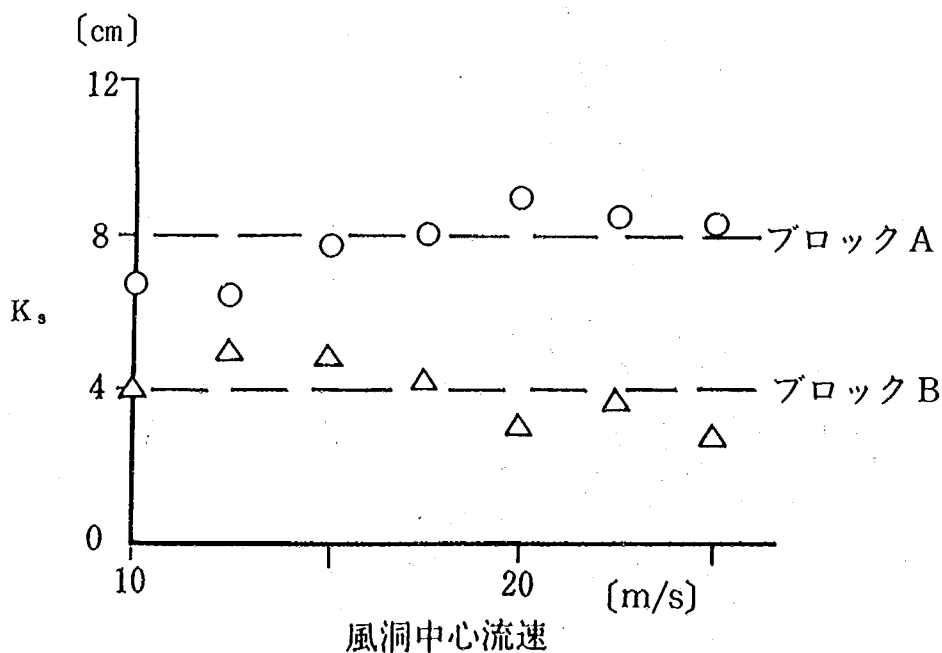


図3-11 K_s と風洞中心流速との関係

取することを考える。(3-2)式からわかるように、原点からの距離 $(y - y_0) = a \cdot K_s$ (a : 定数)の位置での流速 u と u_* との比は水深や R_s などの水理条件によって変化せず一定となる。この流速を代表流速とした場合、(3-1)式より u^2 が抗力 D と比例関係を満足することから、少なくとも C_D は水理条件によらず一定となる。以上の点に着目して、上記の条件を満たす最も簡単な条件 $y = K_s$ での流速を代表流速とする。以上より得られたブロック群内部にあるブロック($X \approx 1.5 \text{ m}$)の C_D , C_L を図3-12に示す。なお、図中の R_s を算定する際に用いる代表長さには、ブロック突起部分の流れ方向の長さを取っている。図より C_D , C_L は、ブロックBの C_L を除いて、単体の場合と同じオーダーになることがわかる。ブロックBの C_L が1オーダー小さいのは、突起の高さが長さに対して非常に小さい形状をしているためと考えられる。また、 R_s による C_L の変化は小さく、ブロックの種類ごとにほぼ一定とみなせる。以上により、上記の投影面積、代表流速の取り方によって、ブロック群内部の抗力、揚力を単体と同じように(2-3), (2-4)式から計算できることが示された。

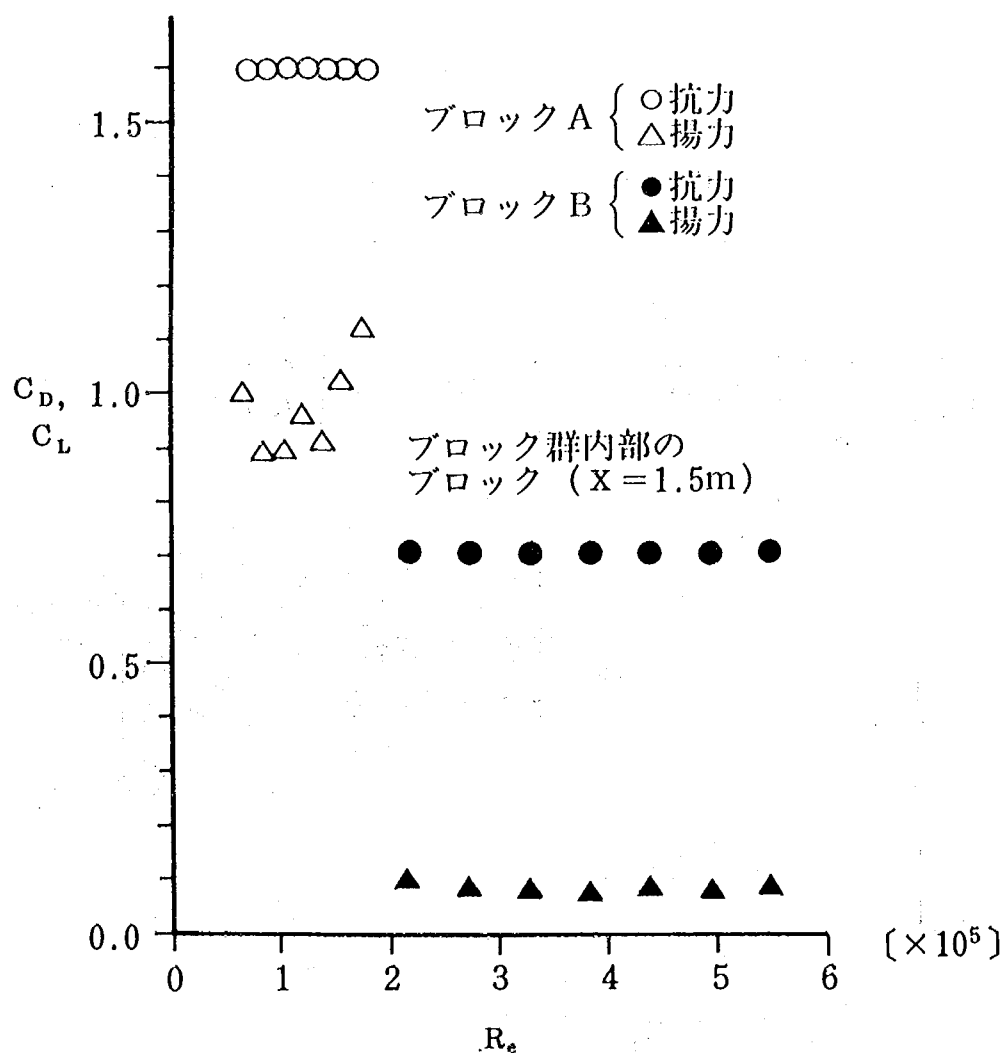


図3-12 ブロック群内部の C_D , C_L

3.4.3 張ブロックの目地の有無について

ブロックBは、主に張ブロックとして用いられ、実際にはブロックとブロックとの間に目地が施工される。3.4.2までに示した実験では、ブロック模型を密に敷き詰めて行っており、これは、洪水中でも目地が損傷を受けていない状況を想定していることになる。本項では、施工された目地が崩壊した場合を想定して、全てのブロックの間隔を1cm開けて行った実験の結果を示す。ただし、本実験では、ブロック群内の最上流端より5個目($X = 1.54\text{ m}$)のブロックに作用する力だけを測定した。測定された力を図3-13に示す。目地がある場合(ブロック間に隙間がない場合)の結果と比較すればわかるように、目地がなくなった場合の方が、抗力、揚力とも小さくなる。これは、目地がない場合、そのすき間に空気が流れ込むようになり、ブロック群最上流端にあるブロックによる流れのはね上げの度合いが小さくなること、また、ブロック内外の空気流の混合によってブロック近傍の流速が低減させられるためと考えられる。この結果から、流水中でのブロックの安定性を検討する際には、目地が損傷を受けていない状態だけを考えればよく、目地の崩壊した後のすき間については考慮する必要がないことがわかる(注1参照)。

注1) ここでの議論は、あくまでブロックの力学的な安定だけを対象にしたものである。実際には、ブロック自体の安定の他に、ブロック下の砂の吸出しの問題があり、これについては、目地の損傷が大きな影響を持つ。

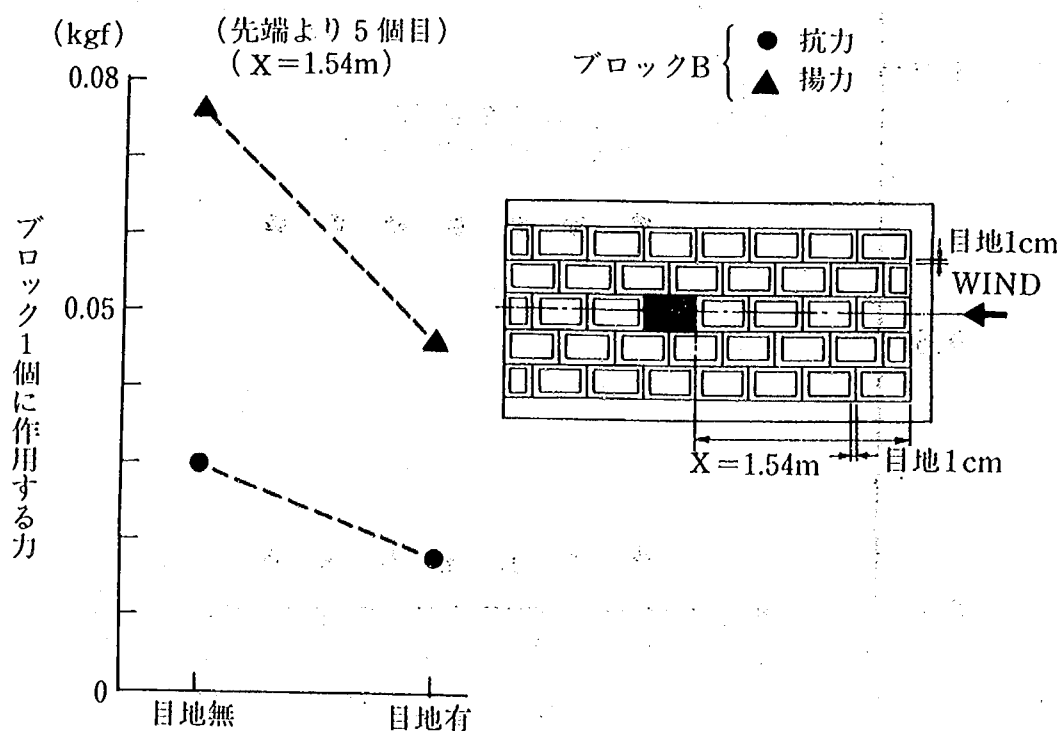


図3-13 ブロックの目地の有無による流体力の変化

3.5 流向と平行でないブロックに作用する流体力の特性

湾曲部の外岸等で2次流が作用するような状況を想定すると、ブロックの側面と流向とがなす角度 β が0でなくなる。ここでは、このような状況におけるブロックに作用する流体力の特性を検討した。実験において流向を変えることは困難であるため、図3-14に示すように模型の方を回転させて実験を行なった。また通常、抗力、横力は、それぞれ流向と同じ方向、流向と直角をなす方向の力として定義されるが、ここでは、ブロック側面と平行な方向の力を抗力 D 、側面と直角をなす方向の力を横力 F_s と定義した(図3-14)。これは、このように抗力、横力を定義すると、横力が法面に置かれたブロックを最大傾斜方向に引きずり下ろす力となり、法面に置かれたブロックの安定性を計算する上で便利であるからである(4章参照)。以下に示すデータは、すべて図3-14に示した抗力、横力の定義によるものである。なお、通常の設定による抗力、横力をそれぞれ D' 、 F'_s (図3-14参照)とすると、ここで定義された D 、 F_s と D' 、 F'_s との関係は下式で表わされる。

$$D' = D \cos \beta + F_s \cdot \sin \beta \quad (3-3)$$

$$F'_s = -D \sin \beta + F_s \cdot \cos \beta \quad (3-4)$$

上式からわかるように、 $\beta = 0$ の時、 $D' = D$ 、 $F'_s = F_s$ となる。

ブロックに対して流れが斜めから作用すると、流向がブロックと平行であった場合には作用しなかった横力 F_s が作用するようになる。図3-15に、単体ブロックとブロック群最上流端及び内部のブロックに作用する流体力を示す。図より、単体ブロックの場合には、 β の増大に伴って横力が大きくなり、 $\beta = 10^\circ$ 以上では揚力、抗力と同じような値となることがわかる。一方、最

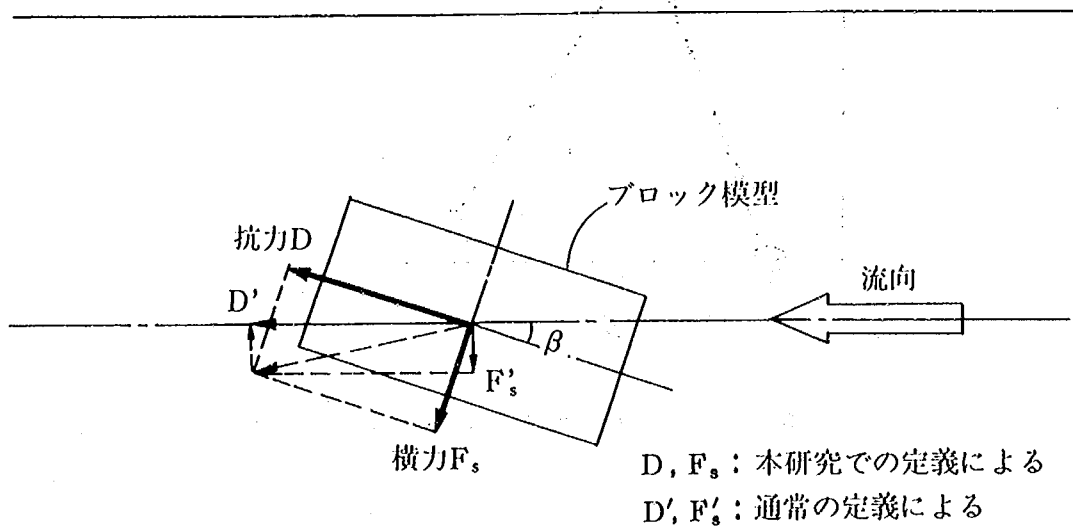


図3-14 流向と平行でないブロックに作用する流体力

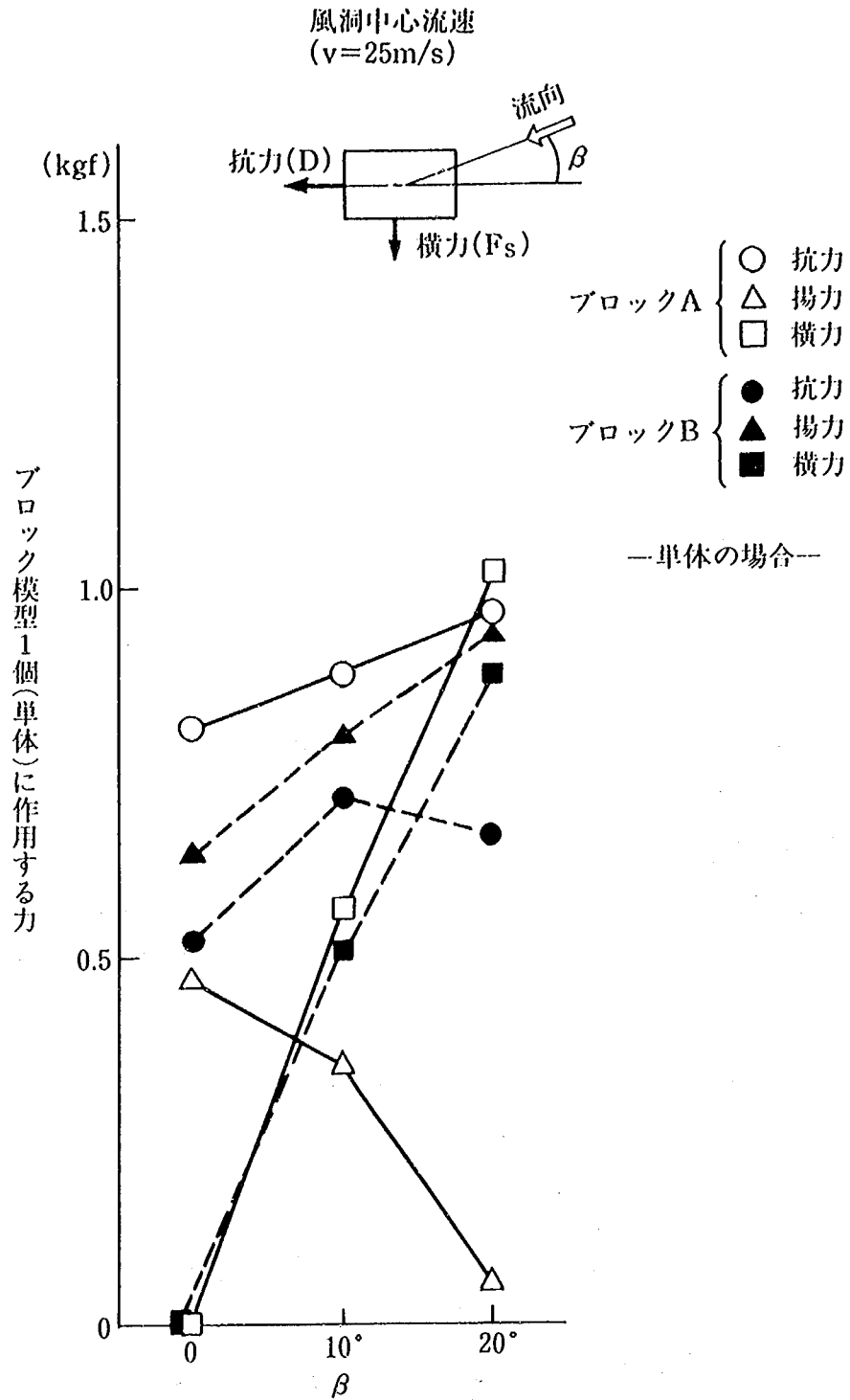


図 3 - 15 抗力, 揚力, 横力と β との関係

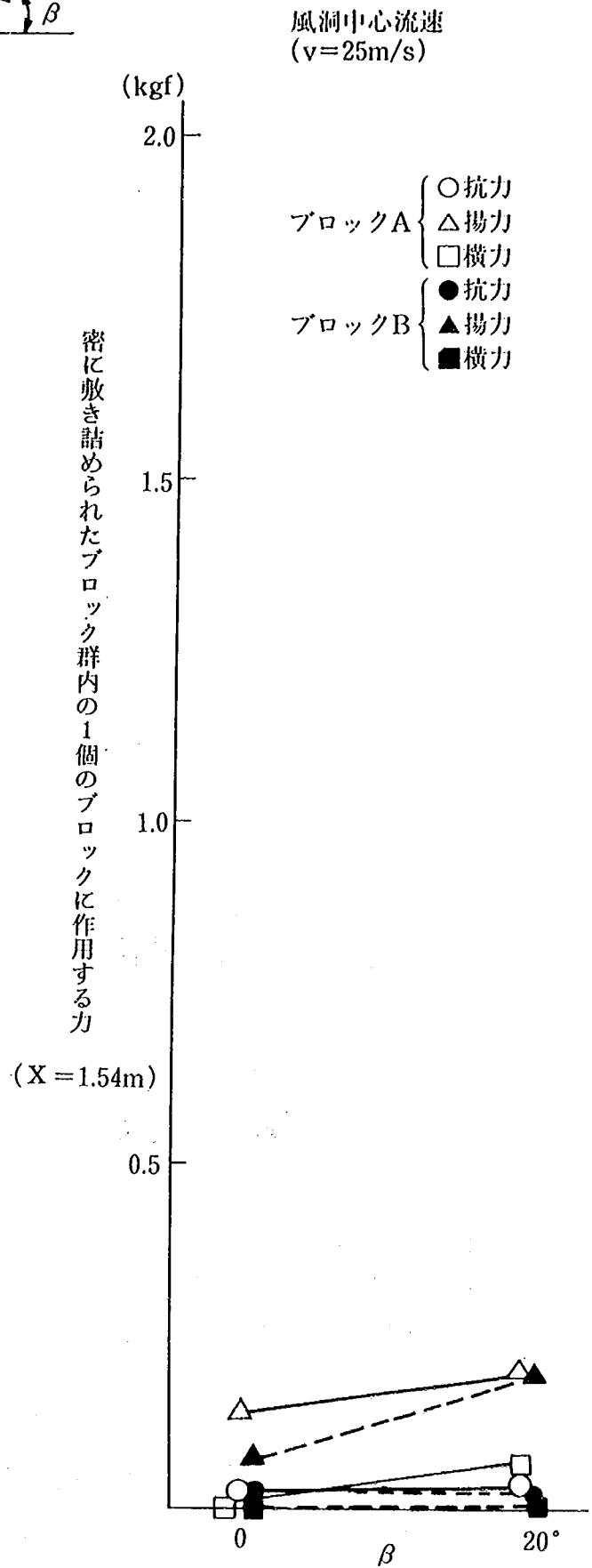
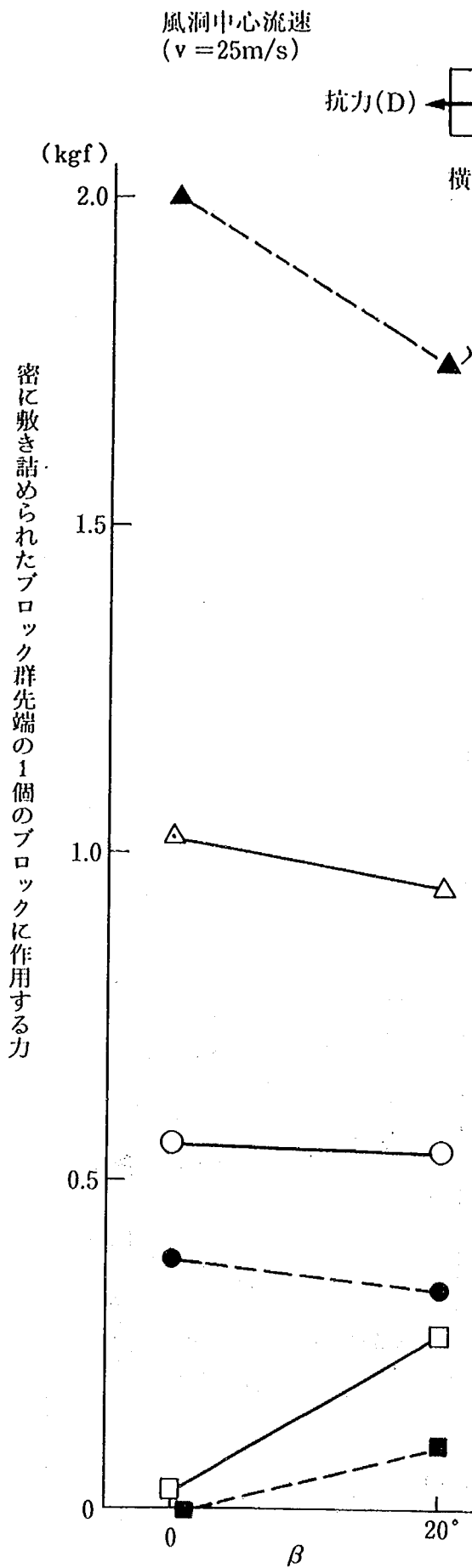


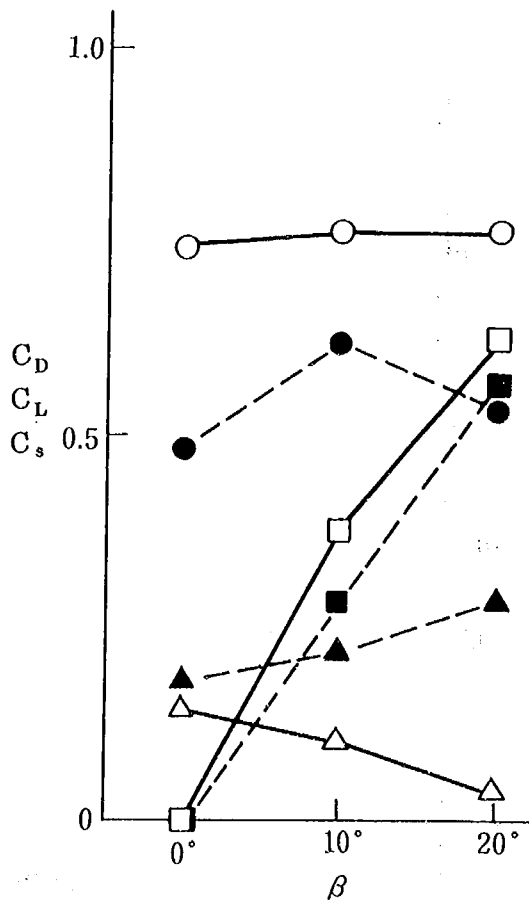
図 3 - 15 (つづき)

上流端ブロックの場合には、 β による横力の変化は小さく、またその大きさは $\beta = 20^\circ$ の場合でも揚力よりはるかに小さい。ブロックAの横力がBよりやや大きいのは、ブロックAが横からの力を受けやすい突起を持っているからである。また、ブロック群内部のブロックに作用する横力は抗力と同様小さく、 β による変化も小さい。抗力、揚力の β による変化は、単体のブロックAの揚力を除いて小さい。単体のブロックAの揚力が β の増大に伴い減少するのは、 β が増大すると流れがブロック上に乗り上げにくい形状になるためと考えられる。図3-16には、単体で置かれたブロック模型と密に敷き詰められたブロック群の最上流端ブロックの抗力、揚力、横力係数を示す。横力係数 C_s は、横力 F_s に対して下式により定義される横力係数である。

$$F_s = 1/2 \cdot \rho \cdot C_s \cdot A_s \cdot u^2$$

(3 - 5)

単体の抗力、揚力、横力係数
(風洞中心流速 $v = 10 \sim 25 \text{ m/s}$ の最大値)



ブロック群の先端ブロックの抗力、揚力、横力係数
($v = 10 \sim 25 \text{ m/s}$ の最大値)

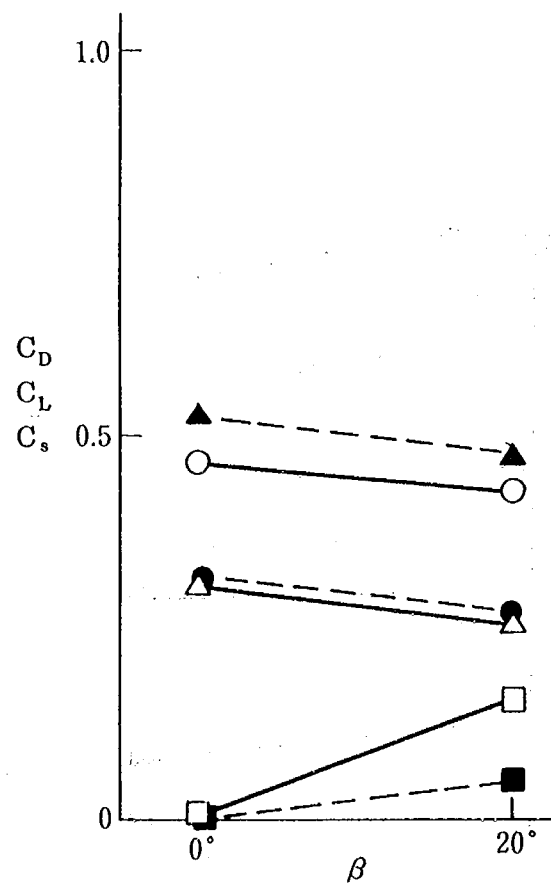


図 3 - 16 C_D , C_L , C_s と β との関係

A_s : 横力が作用する方向のブロック 1 個の投影面積である。 C_D , C_L , C_s は、それぞれブロック 1 個全体から求めた A_D , A_L , A_s により計算している。また、代表流速には風洞中心流速を用いている。図より、 C_D , C_L , C_s の β による変化も、流体力と同じ特性を示している。以上のように単体ブロックの場合には、流れが斜めに作用することの影響が強く現われる。最上流端ブロック、ブロック群内部のブロックの場合には、その影響は小さい。

3.6 最上流端ブロックの下が洗掘された場合の流体力の特性

ブロック A は連接ブロックとして用いられる。連接ブロックを施工する場合、ブロック最上流端に隔壁等を設置せず、いきなりブロックが設置される場合がある。このような場合、洪水中最上流端ブロック下の土が洗掘され、最上流端ブロックが鉄筋による連接作用だけで支えられ、洪水後宙づりになることも考えられる。ブロックの安定にとって最も厳しいこのような状況を想定し、その下が洗掘された最上流端ブロックに作用する流体力の特性を調べる。

実験では、最上流端ブロック下の洗掘について 2 つの状況を想定した。1 つは、図 3-17 の右に示す洗掘状況であり、実験では図の左に示すようにブロック模型に仰角を付けた（洗掘タイプ a）。もう 1 つは、ブロック下が図 3-18 の右に示すように洗掘を受けた状況であり、実験で

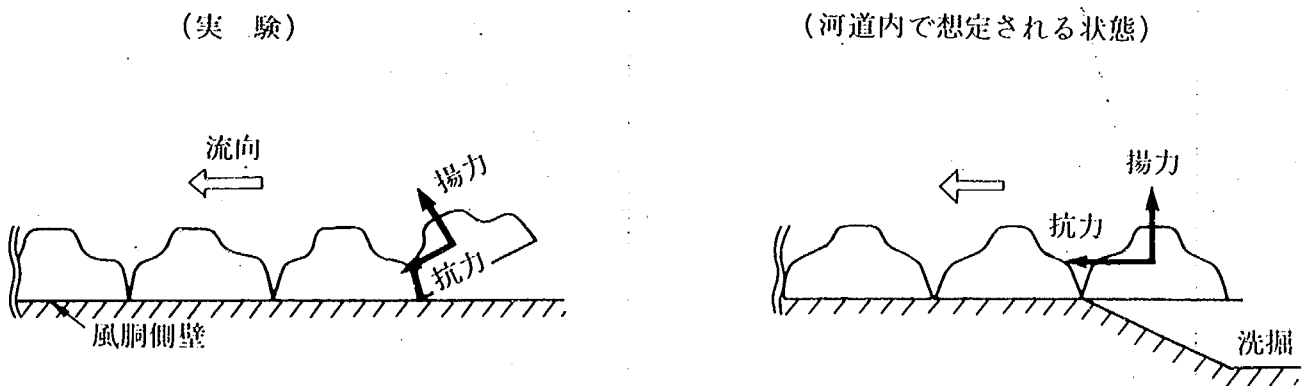


図 3-17 想定した最上流端ブロック下の洗掘状況－洗掘タイプ a－

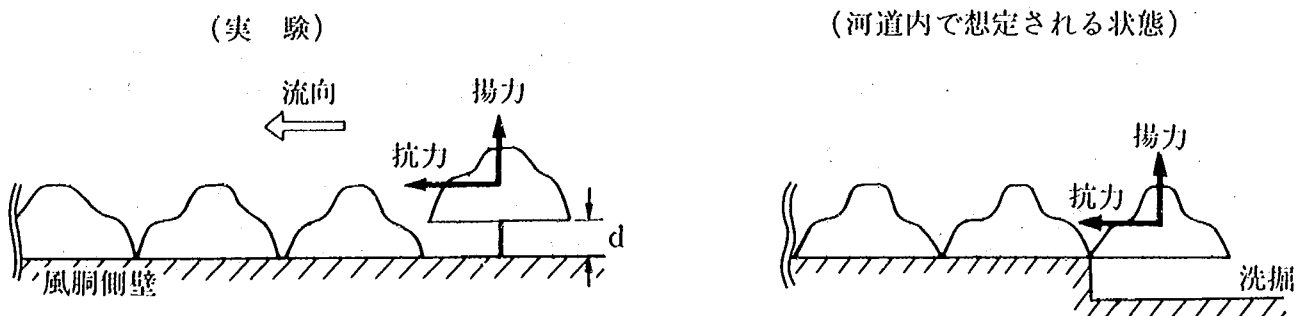


図 3-18 想定した最上流端ブロック下の洗掘状況－洗掘タイプ b－

は同図の左のようにブロックを設置した(洗掘タイプb)。いずれの場合についても、ブロック底面に平行な方向の力を抗力、それと直角をなす方向の力を揚力とした(図3-17, 18参照)。洗掘タイプaの場合に作用する力を図3-19に示す。ブロック下が洗掘されると抗力は洗掘が無い場合に比べて若干減少するが、揚力が著しく増大する。洗掘タイプbの場合にブロックに作用する力を図3-20に示す。洗掘の増大とともに抗力は次第に増加する。揚力は、洗掘深が浅

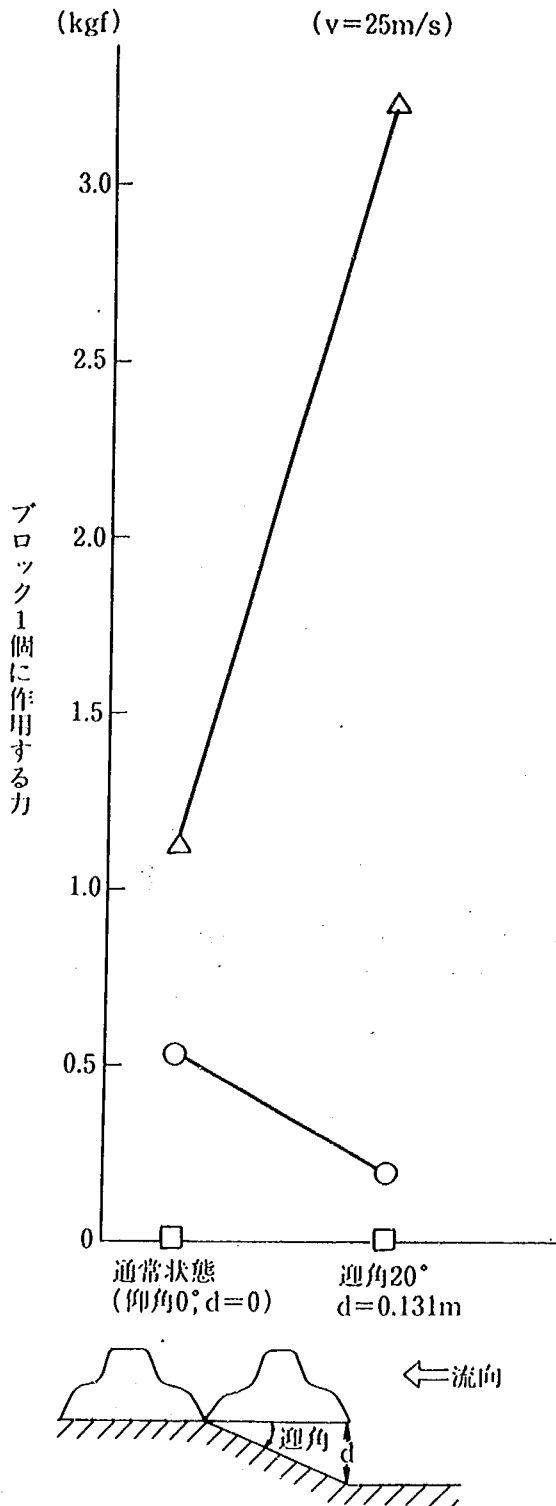


図3-19 ブロックに作用する力
-洗掘タイプa-

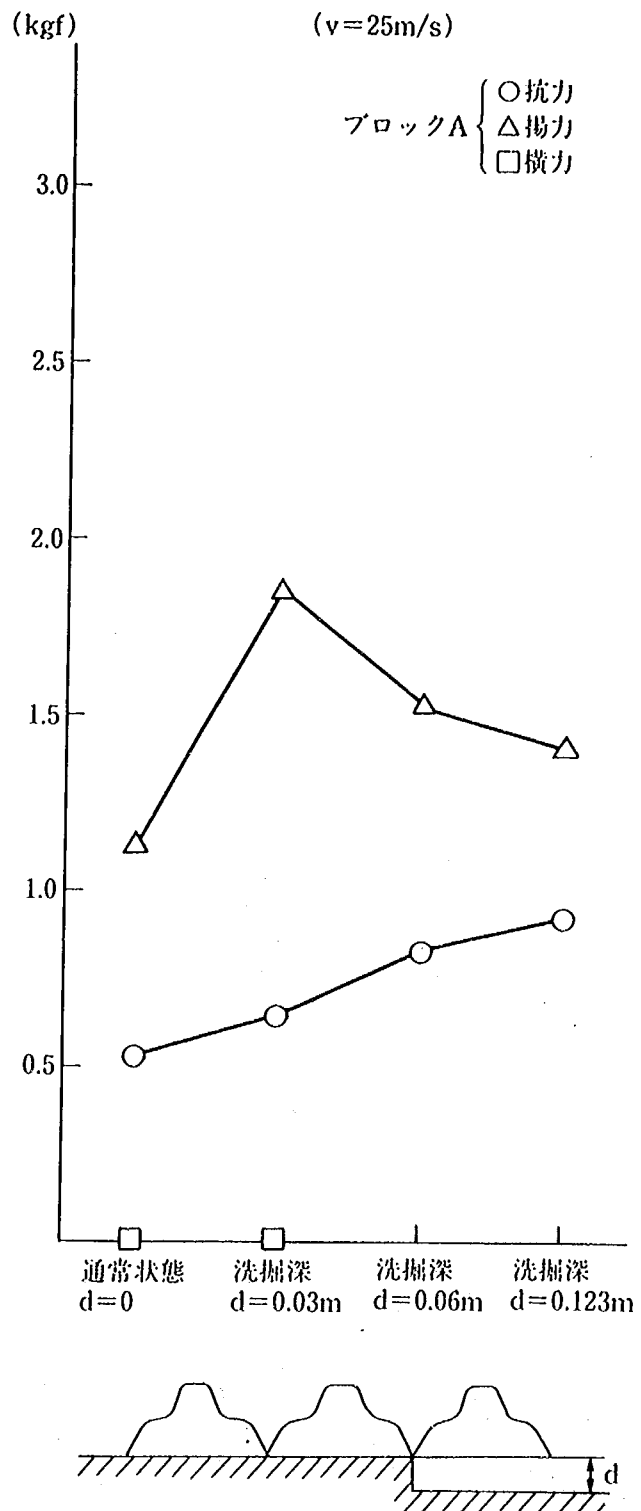


図3-20 ブロックに作用する力
-洗掘タイプb-

くブロック下の洗掘された箇所が下流側のブロックによって遮へいされ死水域となっている場合には揚力は増大するが、洗掘深がさらに増加することによって遮へい効果が減少すると揚力も減少していく。洗掘タイプ a, b の抗力, 揚力係数を図 3-21, 3-22 に示す。

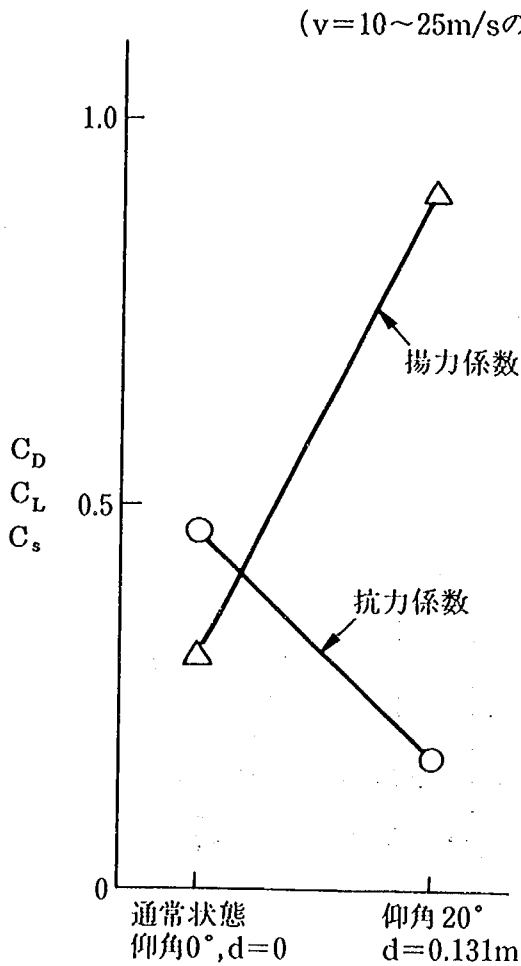


図 3-21 C_D, C_L -洗掘タイプ a-

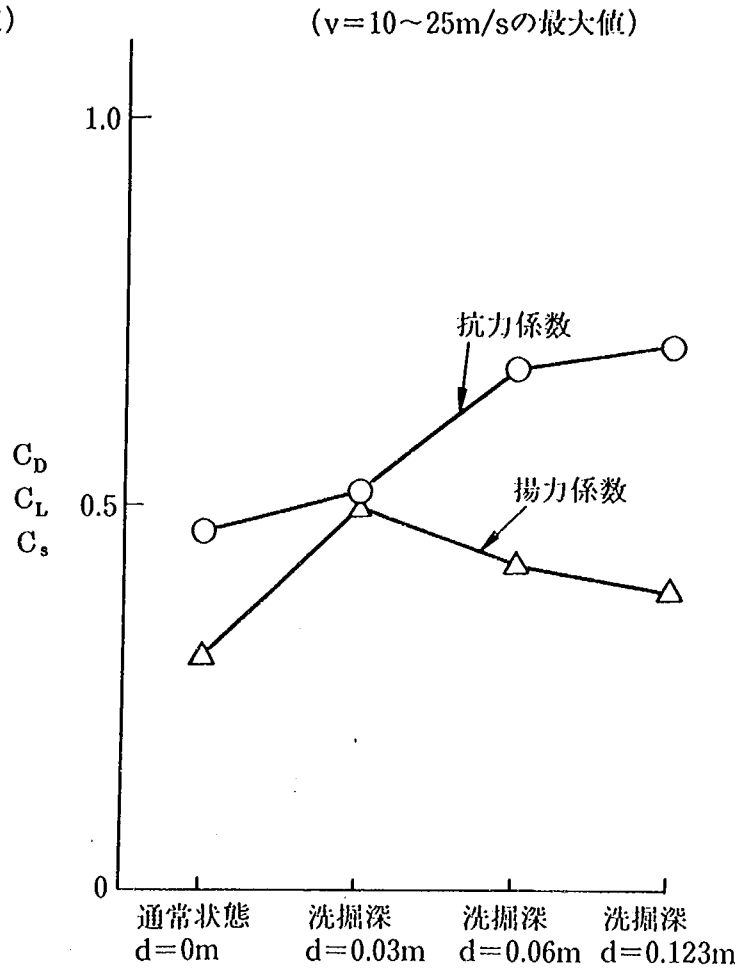


図 3-22 C_D, C_L -洗掘タイプ b-

係数の計算に当たっては、投影面積をブロック 1 個全体から求め、代表流速に風洞中心流速を用いている。以上から、最上流端ブロックの下が洗掘を受けると、洗掘を受けていない通常の場合に比べて、抗力、揚力とも変化し、全体としてブロックが不安定になることがわかる。

3.7 ブロックに作用する流体力の作用線

ブロックを転動させる外力となるモーメントを知るためには、抗力、揚力の値だけでなく、それらの作用線の位置を明らかにする必要がある。そこで、ブロック A, B をそれぞれ単体で設置した場合について、3 分力の他にモーメントを測定することができる 4 分力検出器を用いて、抗

力と揚力の合力の作用線を調べた。その結果得られた単体のブロック模型に作用する合力の力の作用線を図3-23, 3-24に示す。図よりA, Bいずれのブロックも流速の変化による合力の作用線位置の変化が小さいことがわかる。また, A, Bブロックの作用線を比較すると, ブロックAの作用線の方が転動する際の支点(図中の星印で示した点)との距離が近いことがわかる。このことは, 同じ合力が作用した場合, ブロックAの方がBよりも転動させようとするモーメントが小さいことを示している。これは, 写真3-1に示すブロック周辺の流況からわかるように, ブロックBの上流側を向いた面が流体を大きく跳ね上げ, ブロックBの天端全体に大きな負圧を発生させるのに対し, ブロックAでは, 流れがはく離し大きな負圧が作用する場所が下流側のブロック面に限られているためと考えられる。このように, ブロックの上流側の面が直立し, 流れをはね上げてブロック天端の広い範囲に負圧を発生させる形状を持つブロックには, 転動の原因

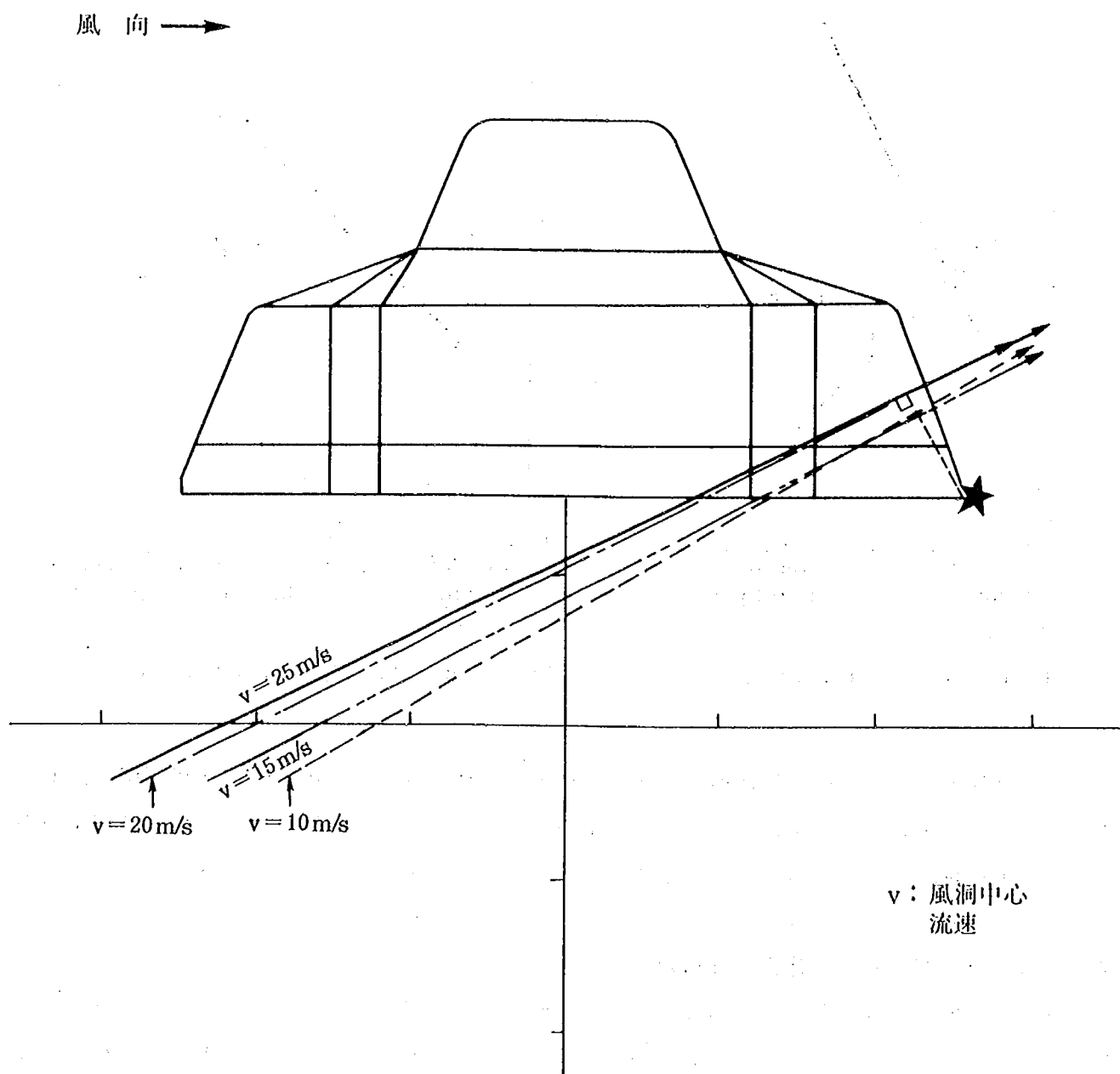


図3-23 ブロックAの力の作用線(単体)

となるモーメントが作用しやすい。

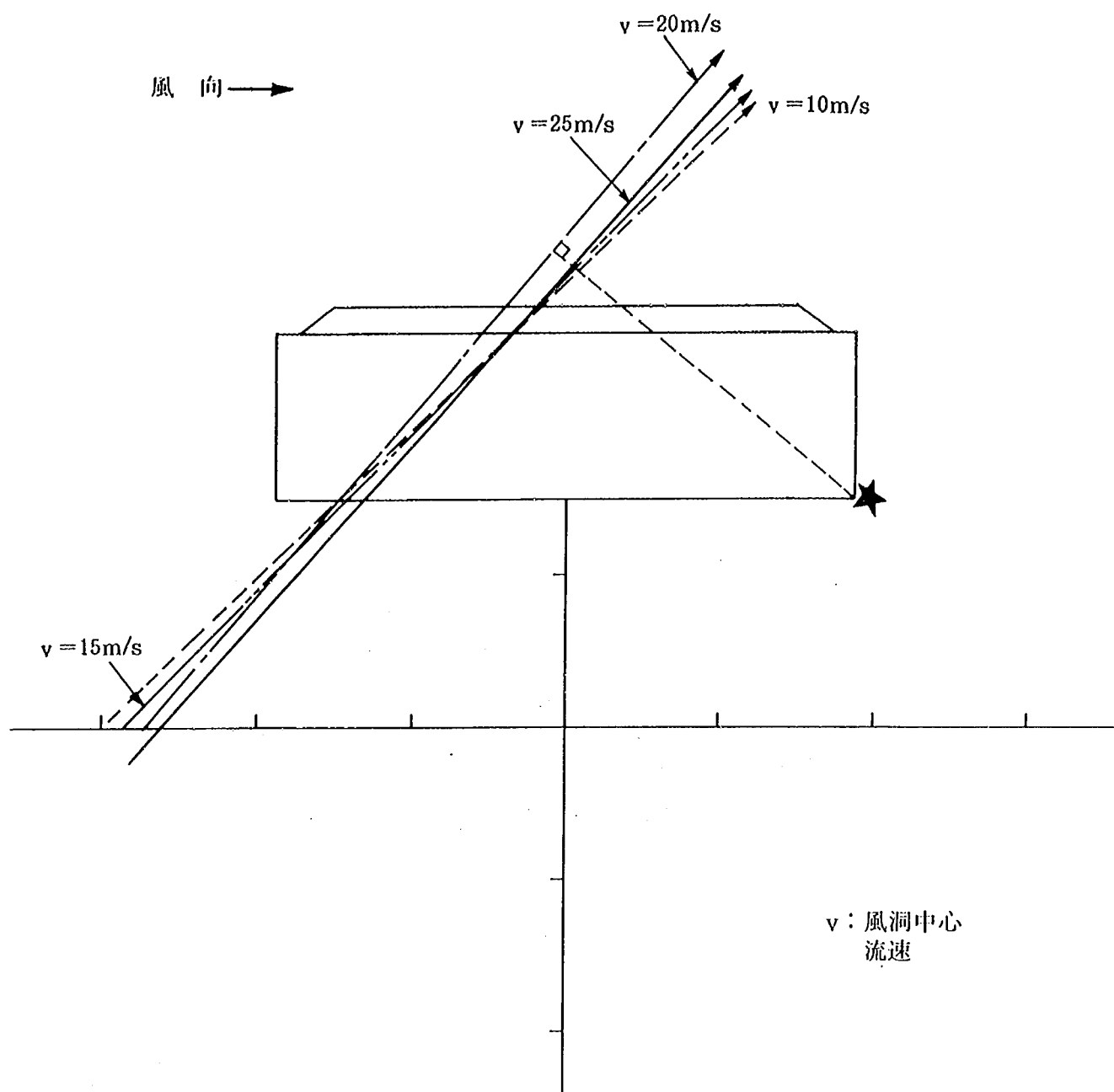
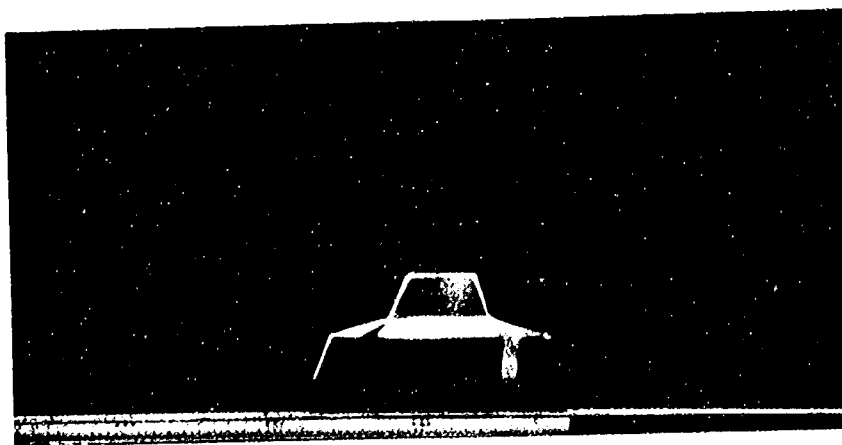


図 3 - 24 ブロック B の力の作用線 (単体)

a) ブロック A



b) ブロック B



写真 3 - 1 ブロック周辺の流れの状況

第4章 流水中に置かれたブロックの安定性

4.1 概 要

流水中での護岸法覆ブロックの移動は，護岸法覆工の破壊に直結する。したがって法覆ブロックは，想定される流速に対して常に安定な状態，すなわち流水中で滑動も転動も起こさない状態になければならない。本章では，3章で得られたブロックに作用する流体力の特性に基づいて，さまざまな状況に置かれたブロックの流水中での安定性について検討を行い，流水中で安定な護岸ブロックの設計法を確立するために必要な情報を得る。

4.2 流水中でのブロックの安定性を判定する方法

4.2.1 流向がブロックに対して平行な場合（横力が作用しない場合）

ブロックが流水中で安定な状態にあるためには，各護岸法覆工ブロックが次のような条件を満たさなければならない。（図4-1参照）

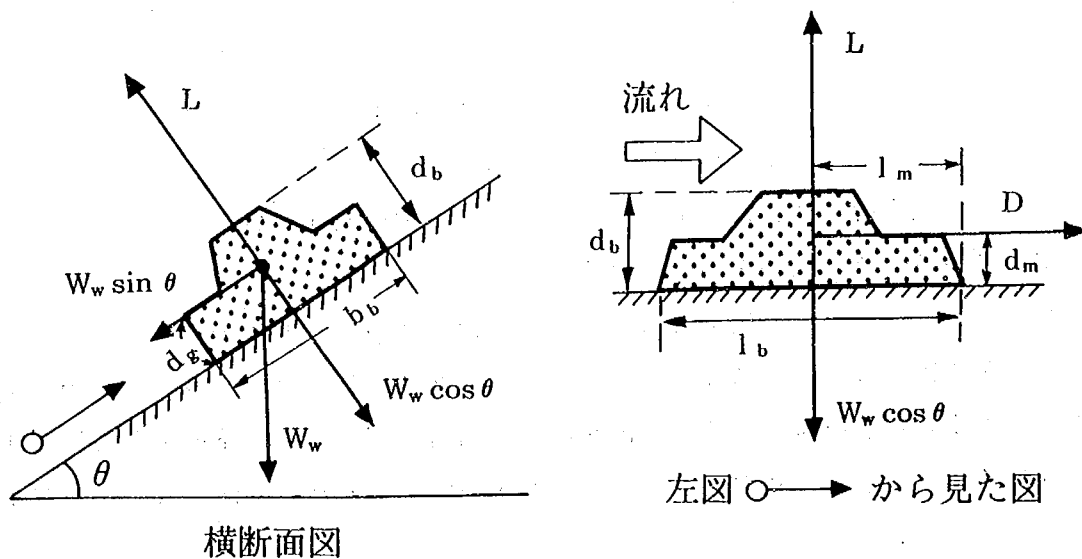


図4-1 法面に置かれたブロックに関する力のつり合い
（流向がブロックに対して平行な場合）

（滑動に対する安定条件）

$$\{ (W_w \cdot \sin \theta)^2 + D^2 \}^{1/2} + \mu \cdot L \leq \mu \cdot W_w \cdot \cos \theta \quad (4-1)$$

① ② ③ ④

（転動に対する安定条件）

・流れ方向の転動

$$D \cdot d_m + L \cdot l_m \leq l_b \cdot W_w \cdot \cos \theta / 2 \quad (4-2)$$

⑤ ⑥ ⑦

・法面最大傾斜角方向の転動

$$W_w \cdot \sin \theta \cdot d_g + L \cdot b_b / 2 \leq b_b \cdot W_w \cdot \cos \theta / 2 \quad (4-3)$$

(8) (9) (10)

ここで、 W_w ：ブロック1個の水中重量， D ：抗力（流れ方向の力）， L ：揚力（法面に対し垂直上向き方向の力）， μ ：ブロックとその下の地盤との静止摩擦係数， θ ：法勾配， l_b ：流れ方向のブロック長さ， d_b ：ブロックの高さ， b_b ：法面最大傾斜方向のブロックの幅， d_m ， l_m ：流れ方向の転動に対する支点より抗力，揚力の作用点までの距離， d_g ：重心の高さである。（4-1）式中の左辺はブロックを滑動させようとする力であり，①はブロックに作用する重力による力，②は抗力による力，③は揚力による力である。一方，この式の右辺④は，左辺の力に対抗する力である。（4-2）式の左辺はブロックを流下方向へ転動させようとするモーメントであり，⑤は抗力による，⑥は揚力によるモーメントを示している。この式の右辺⑦は，左辺のモーメントに対抗するモーメントである。（4-3）式の左辺はブロックを法面最大傾斜の方向へ転動させようとするモーメントであり，⑧はブロックに作用する重力によるモーメント，⑨は揚力によるモーメントを示している。この式の右辺⑩は左辺のモーメントに対抗するモーメントである。（4-1），（4-2），（4-3）式とも，左辺の値が右辺の値よりも大きくなるとそれぞれ滑動及び転動が起こる。

なお，これらの式を導くに当たっては，ブロック間の力の伝達を考慮しておらず，個々のブロックが安定であるための条件を用いている。

4.2.2 流向がブロックに対して斜めである場合（横力が作用する場合）

2次流などが原因となって，法面に置かれたブロックに対して流れが斜めに，かつブロックを法面下に引きずり落とそうとする方向に作用する場合，ブロックに作用する力は図4-2のように示される。このような状況の下でブロックが安定であるためには，次のような条件を満たさなくてはならない。

（滑動）

$$\{ (W_w \cdot \sin \theta + F_s)^2 + D^2 \}^{1/2} + \mu \cdot L \leq \mu \cdot W_w \cdot \cos \theta \quad (4-4)$$

(1) (2) (3) (4) (5)

（転動）

・流下方向の転動

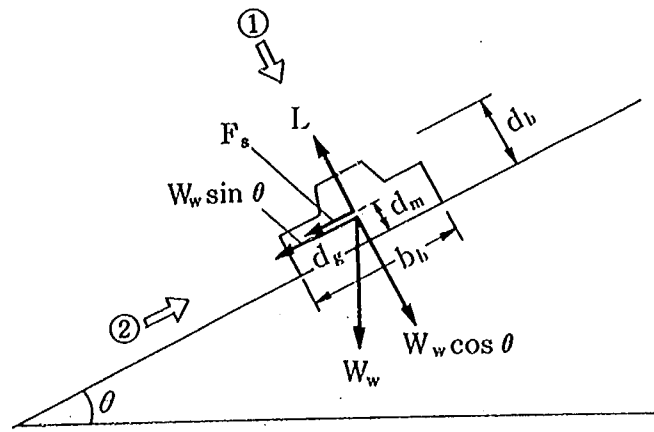
$$D \cdot d_m + L \cdot l_m \leq l_b \cdot W_w \cdot \cos \theta / 2 \quad (4-5)$$

(6) (7) (8)

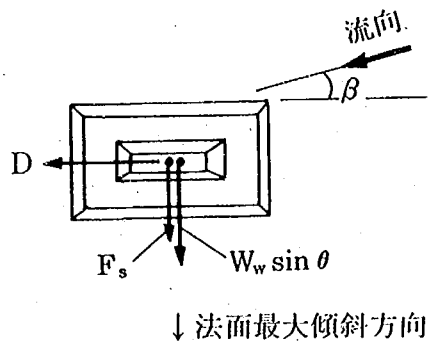
・法面最大傾斜角方向の転動

$$L \cdot b_b / 2 + d_m \cdot F_s + W_w \cdot \sin \theta \cdot d_g \leq b_b \cdot W_w \cdot \cos \theta / 2 \quad (4-6)$$

(9) (10) (11) (12)



①の方向から見た力



②の方向から見た力

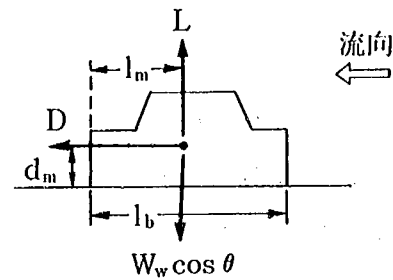


図 4 - 2 法面に置かれたブロックに関する力のつり合い
(流向がブロックに対して斜めである場合)

ここで、 F_s ：横力（法面最大傾斜角方向の力）である。

（ 4 - 4 ）式中の左辺は、ブロックを流れ方向へ滑動させようとする力であり、①はブロックに作用する重力による力、②は横力による力、③は抗力による力、④は揚力による力である。一方、この式の右辺⑤は左辺の力に対抗する力である。（ 4 - 5 ）式の左辺はブロックを流下方向へ転動させようとするモーメントであり、⑥は抗力、⑦は揚力によるモーメントを示す。⑧はこの式の左辺に対抗するモーメントである。（ 4 - 6 ）式の左辺はブロックを法面最大傾斜角方向へ転動させようとするモーメントであり、⑨は揚力、⑩は横力、⑪はブロックに作用する重力によるモーメントである。この式の右辺⑫は左辺のモーメントに対抗するモーメントである。（ 4 - 4 ）、（ 4 - 5 ）、（ 4 - 6 ）式とも、左辺の値が右辺の値よりも大きくなると、それぞれ滑動及び転動が起こる。

なお、これらの式を導くに当たっては、ブロック間の力の伝達を考慮しておらず、個々のブロックが安定であるための条件を用いている。

4.3 ブロックの安定性

ここで、3章で得られた C_D 、 C_L 、 C_s 値と(2-3)、(2-4)、(3-5)式を用いて抗力 D と揚力 L 、横力 F_s を求め、それらを(4-1)～(4-6)式に代入することにより、単体・ブロック群最上流端・それ以外のブロックなど種々の状況下に置かれたブロックの安定性について考察する。考察では、実験で用いたA及びBブロックと全く同じ大きさ、形のコンクリートブロック(Aブロック $W_w = 11 \text{ kg}$ 、Bブロック $W_w = 15.26 \text{ kg}$)が勾配2割の法面に設置される場合を想定した。計算では $\mu = 0.6$ を用いた。また、モーメントを計算する際必要となる抗力、揚力の作用点位置は、3.7に示した単体ブロック実験より得られた作用線から求めた。なお、3.7の結果では流速によって作用線の位置が少し異なるが、本解析では、それぞれのブロックについて最もモーメントが大きくなる作用線位置をすべての流速に用いた。

4.3.1 流向がブロックに対して平行な場合(横力が作用しない場合)

図4-3、4-4にブロックの安定性についての結果を示す。図はいずれも、横軸が代表流速であり、縦軸が滑動あるいは転動に抵抗しようとする力((4-1)式の④の値)あるいはモーメント((4-2)式の⑦、(4-3)式の⑩の値)を1とした場合の滑動あるいは転動させようとする力(あるいはモーメント)である。すなわち、縦軸の値は安全率の逆数 $1/F_s$ 、 $1/F_{r1}$ 、 $1/F_{r2}$ (F_s :滑動についての安全率、 F_{r1} :流下方向の転動についての安全率、 F_{r2} :法面最大傾斜方向の転動についての安全率)を表わす。縦軸の値が大きい方が安定性が低く、 $1/F_s$ 、 $1/F_{r1}$ 、 $1/F_{r2}$ が1以上になったところで対象ブロックが滑動あるいは転動を開始する流速となる。また、 $1/F_s$ 、 $1/F_{r1}$ 、 $1/F_{r2}$ の要因別の内訳も示した。この図より以下のことがわかる。

全般的に、 $1/F_s$ の方が $1/F_{r1}$ 及び $1/F_{r2}$ よりも大きい。このことから、ブロックの安定性を考える上では、通常、滑動に対する安定性を考慮すれば充分であると考えられる。また単体、ブロック群最上流端、ブロック群内部の各位置における安定性をみると、 $1/F_s$ 、 $1/F_{r1}$ はブロック群最上流端についての値が最も大きく、次いで、単体ブロックが大きい。これよりブロック群最上流端のブロックは弱点箇所になりやすいことがわかる。ブロック群内部の $1/F_s$ 、 $1/F_{r1}$ 、 $1/F_{r2}$ 値は最も小さい。このことは、周囲のブロックによって遮蔽されているブロック群内部のブロックの安定性は高いことを示している。さらに、単体の場合を除けば、滑動、転動の場合とも、抗力よりも揚力の方がブロックを不安定にさせる作用が大きいことがわかる。したがって、ブロックの安定性を考える上で揚力による作用を十分考慮に入れる必要がある。

4.3.2 流向がブロックに対して斜めである場合(横力が作用する場合)

図4-5、図4-6にブロックA、Bの安定性を示す。図は前項の場合と同様に、横軸が代表流速であり、縦軸が滑動あるいは転動に対抗しようとする力((4-4)式の⑤の値)、あるいはモーメント((4-5)式の⑧、(4-6)式の⑫の値)を1とした場合の滑動あるいは転動させようとする力(あるいはモーメント)である。縦軸の値は安全率の逆数 $1/F_s$ 、 $1/$

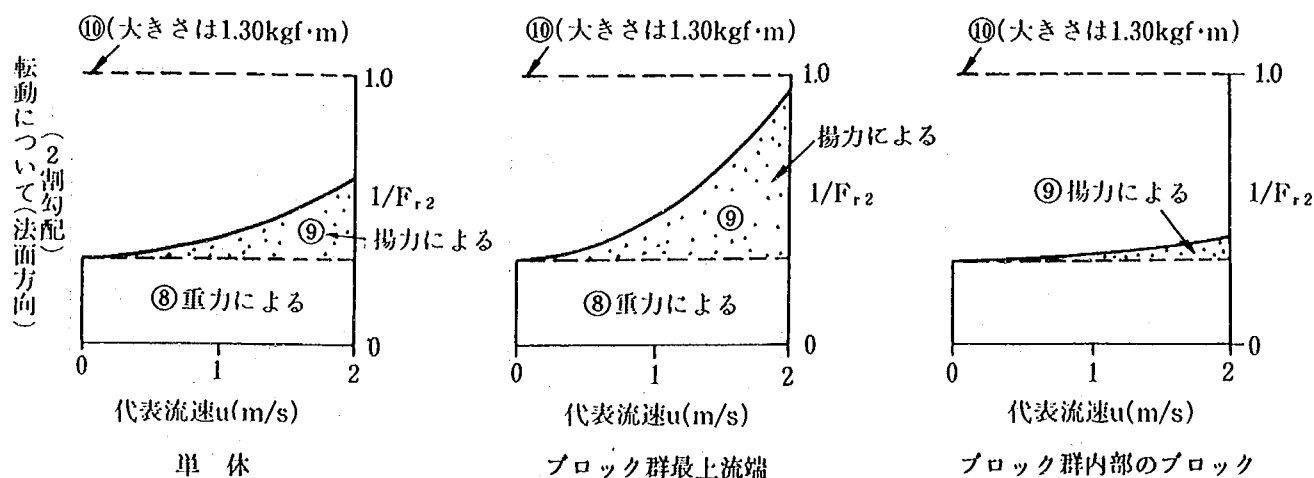
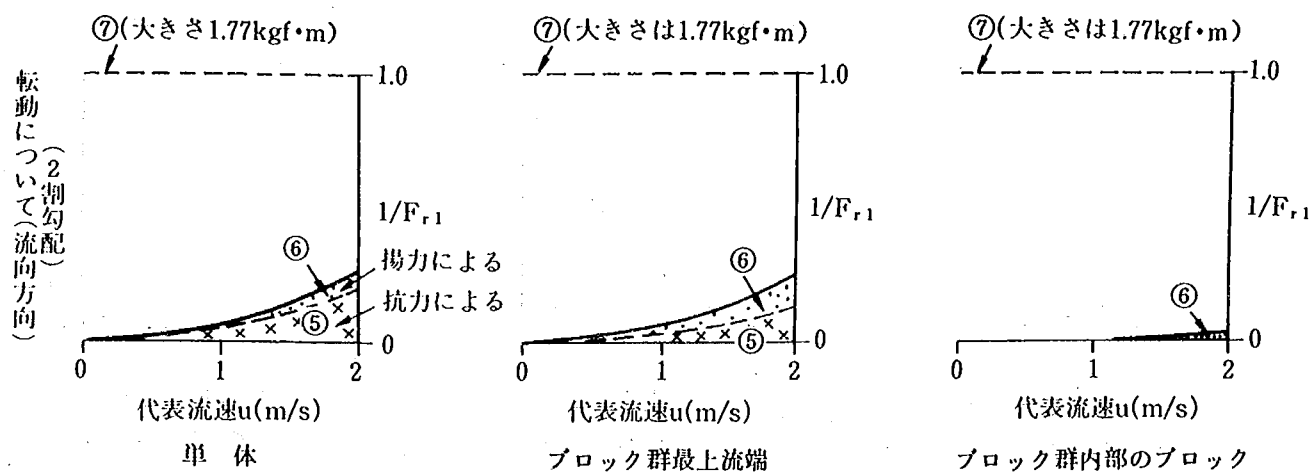
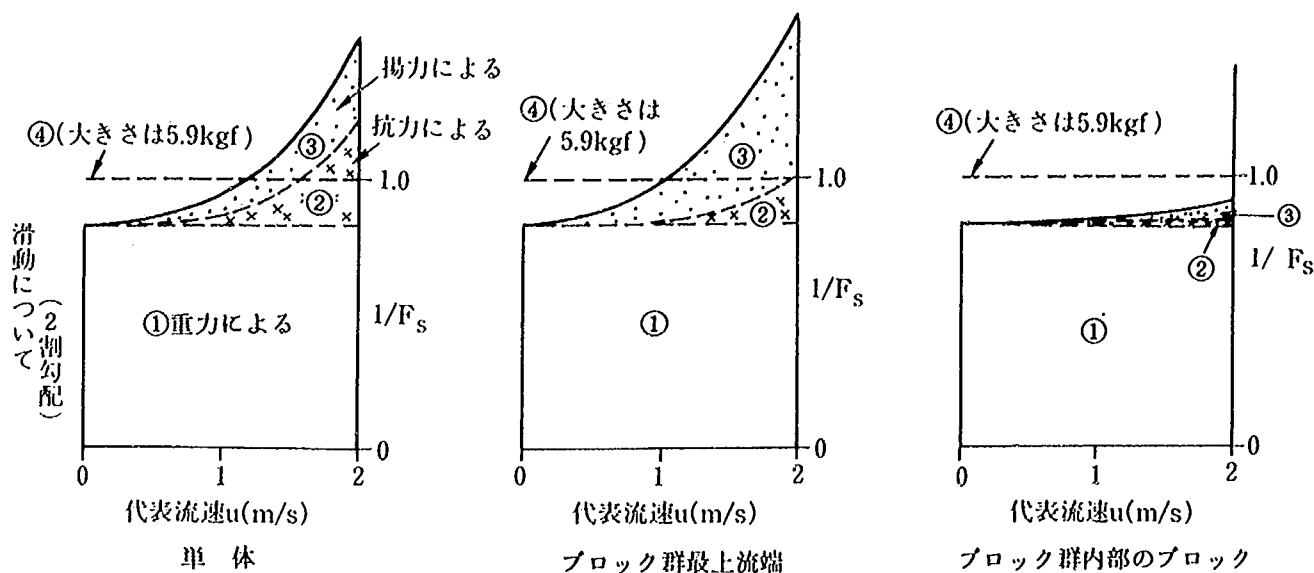


図4-3 種々の状況下にあるブロックAの安定性 - 流向がブロックに対して平行な場合 -
 (F_s: 滑動に対する安全率, F_{r1}: 転動(流向方向)に対する安全率, F_{r2}: 転動(法面方向)に対する安全率)

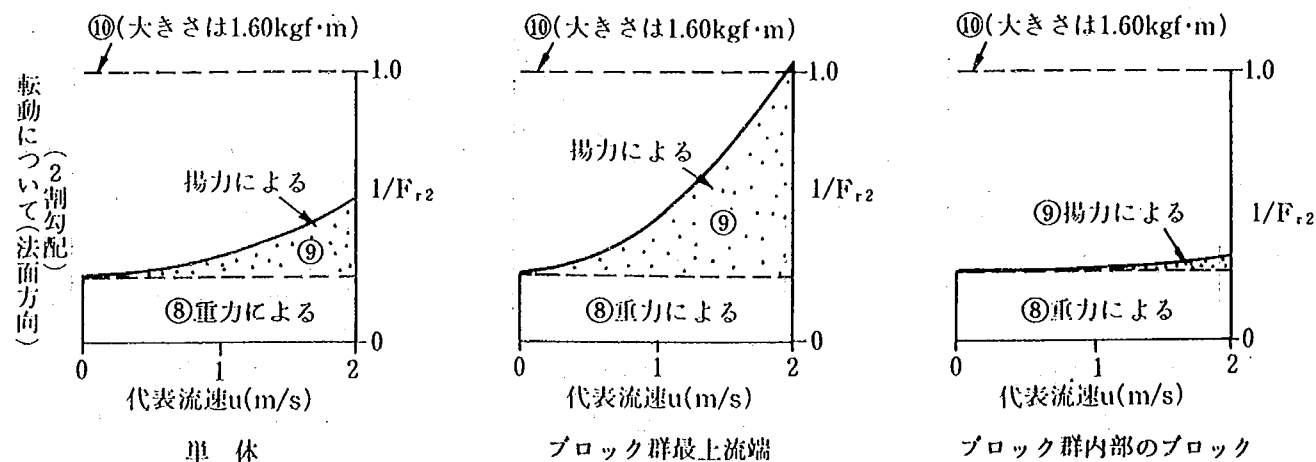
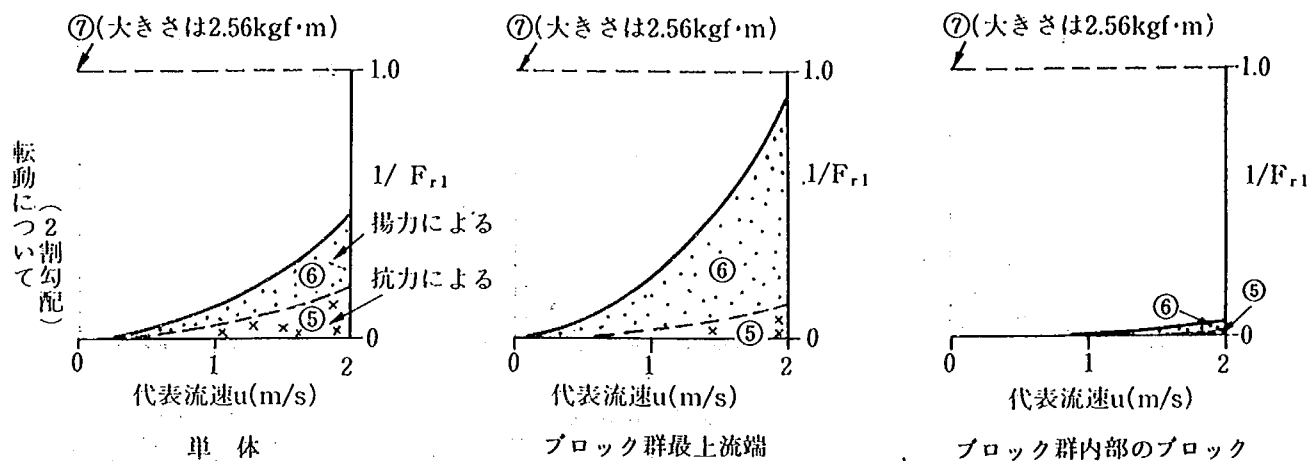
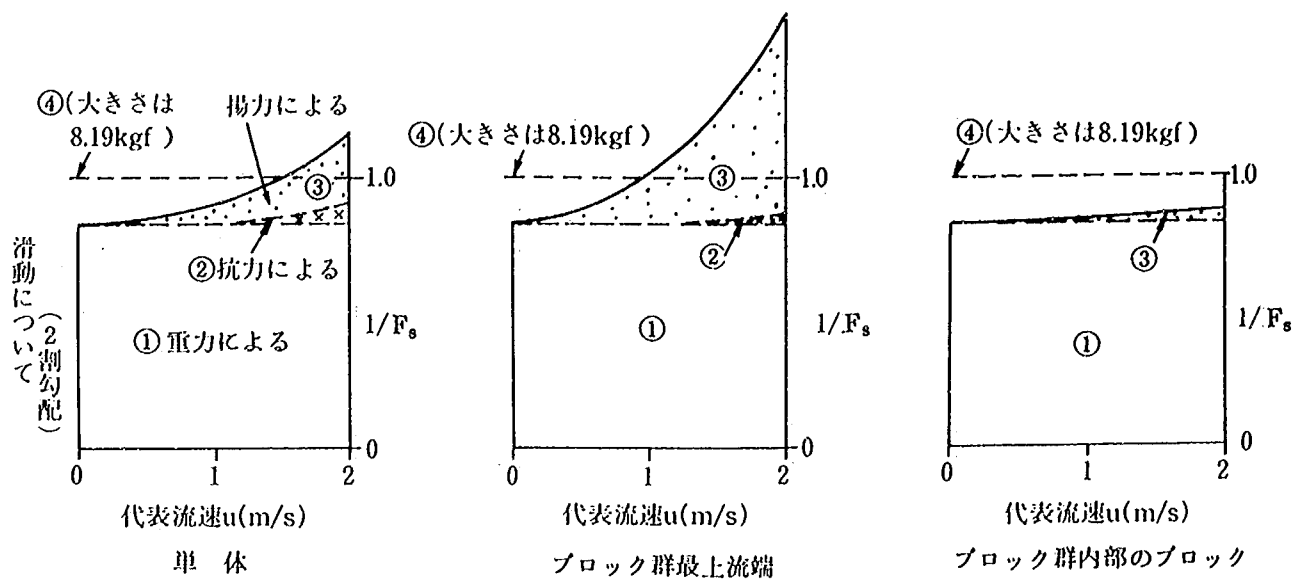


図4-4 種々の状況下にあるブロックBの安定性 - 流向がブロックに対して平行な場合
(F_s : 滑動に対する安全率, F_{r1} : 転動(流向方向)に対する安全率, F_{r2} : 転動(法面方向)に対する安全率)

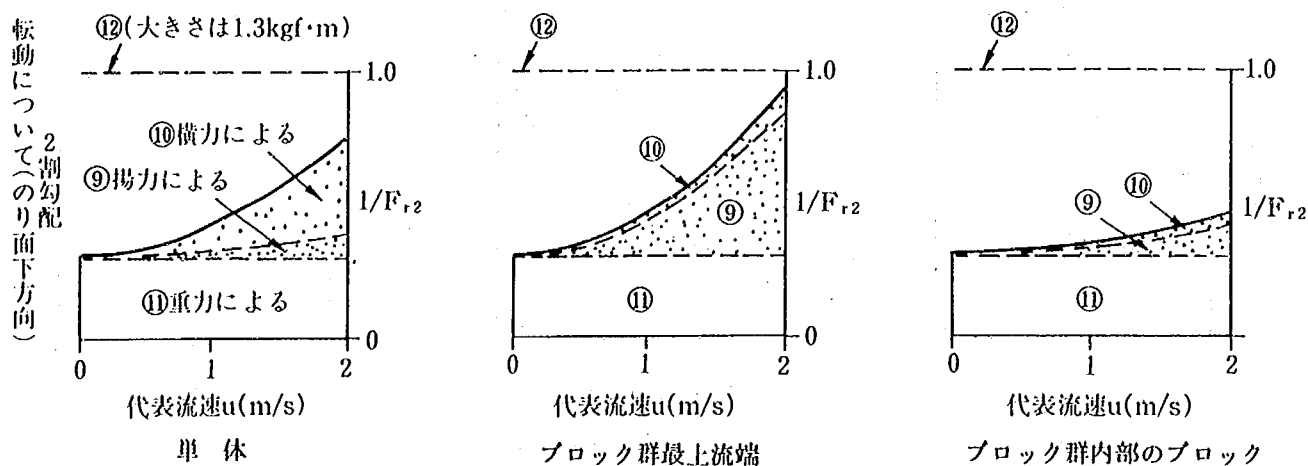
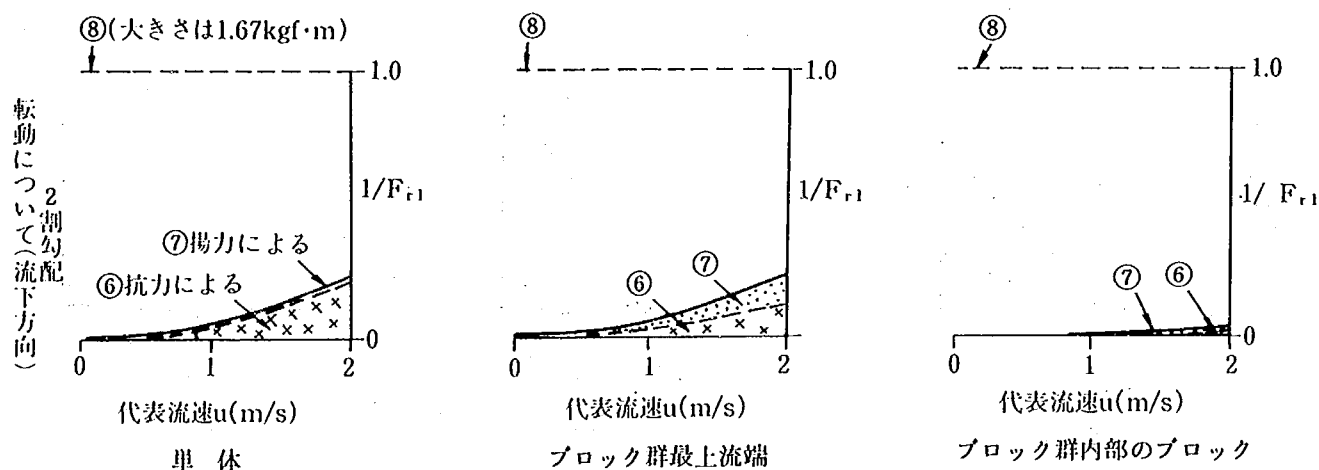
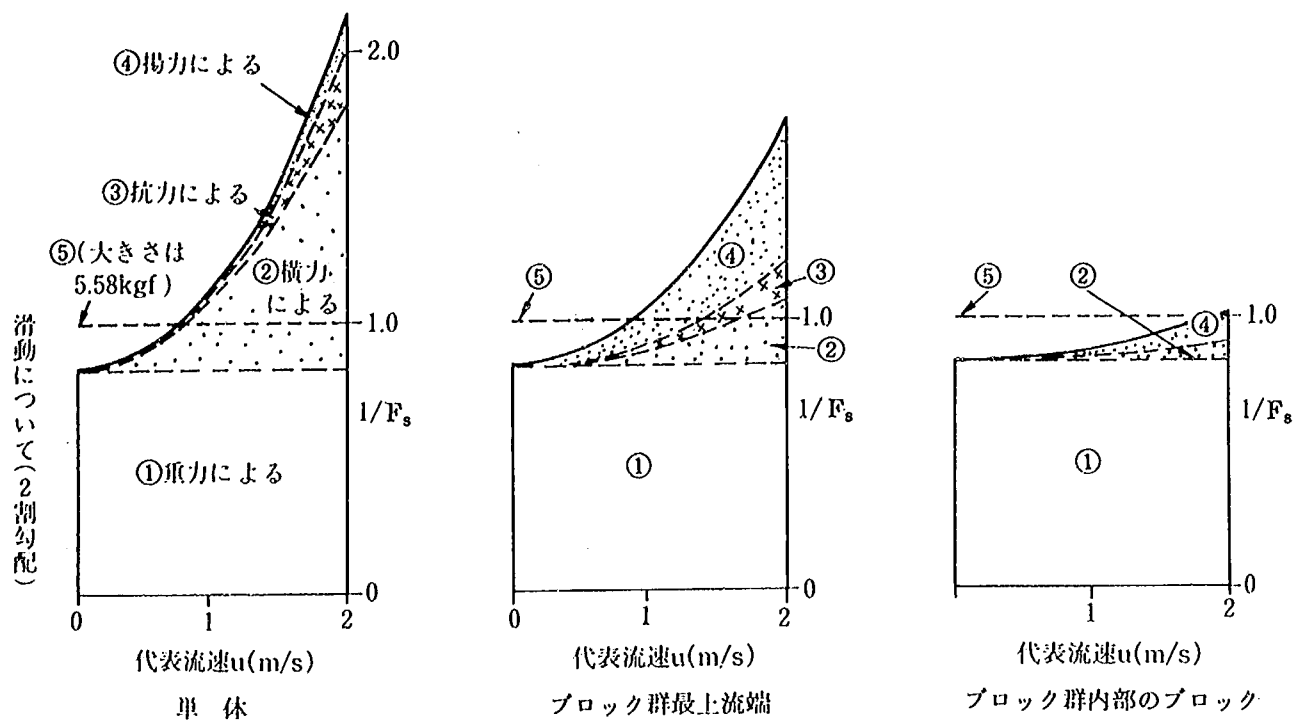


図4-5 種々の状況下にあるブロックAの安定性 - 流向がブロックに対して斜めである場合 ($\beta=20^\circ$) -

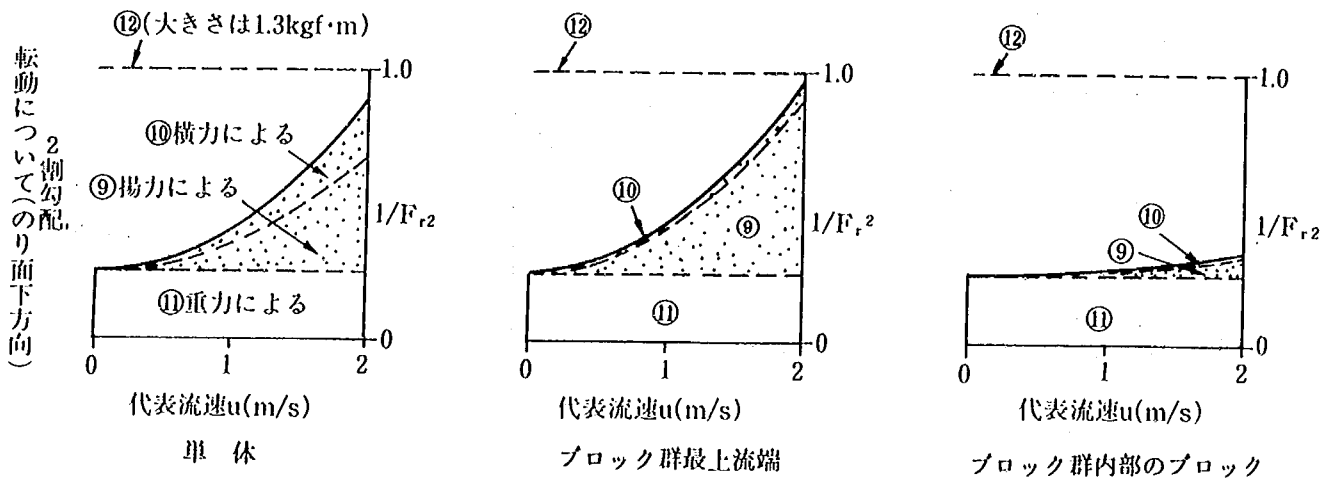
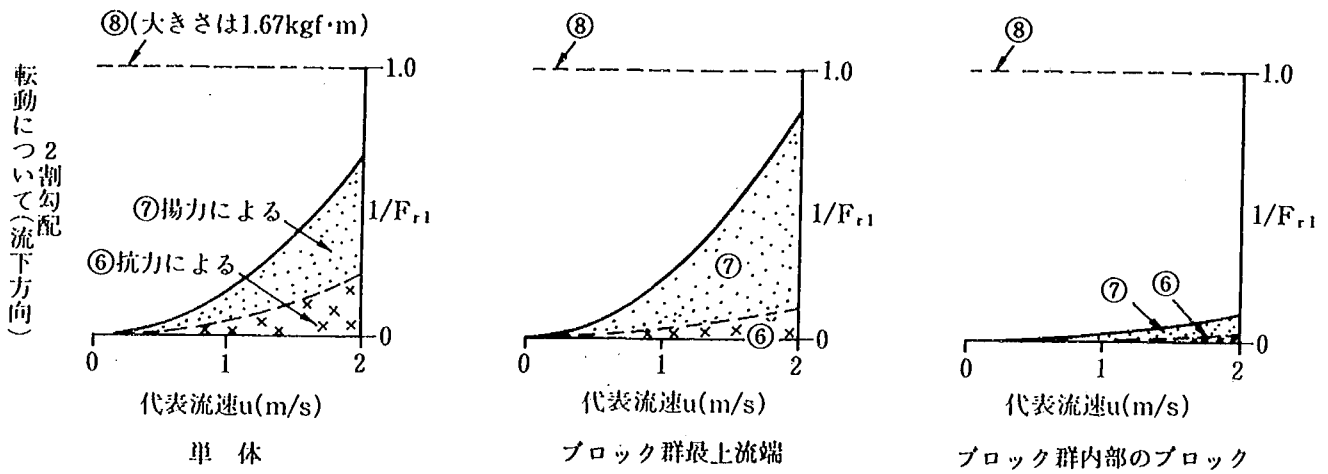
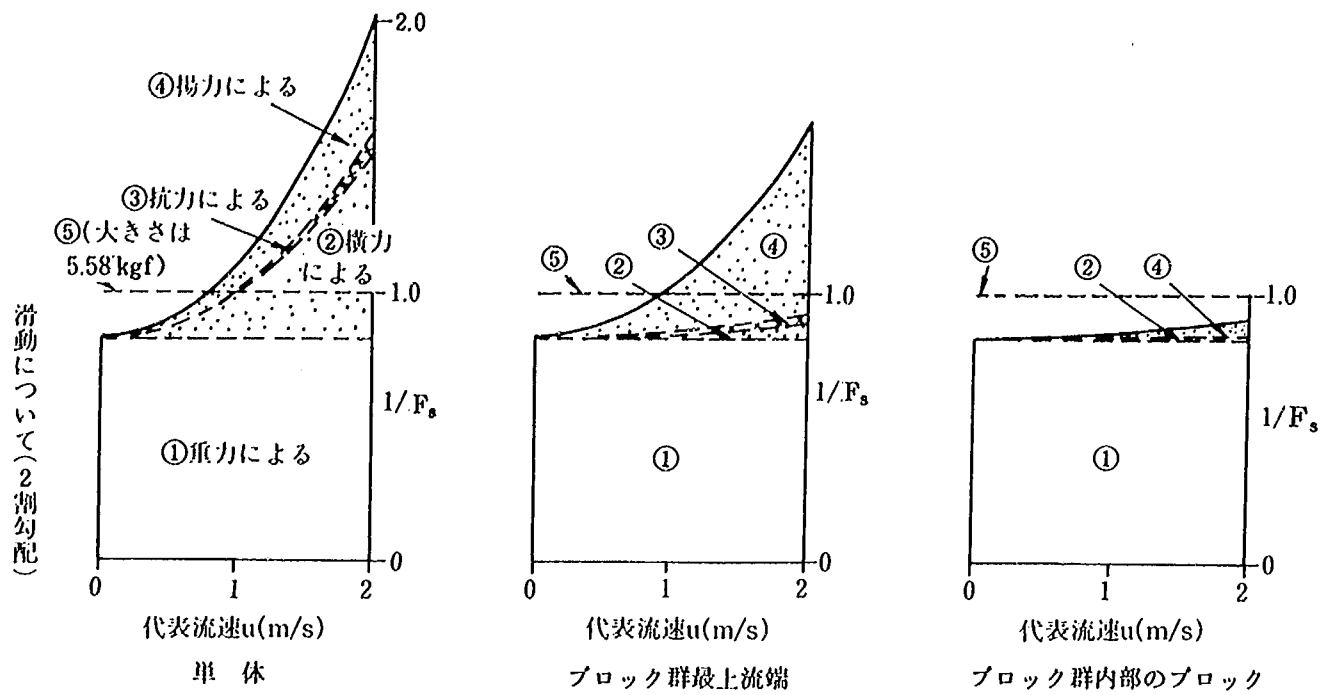


図4-6 種々の状況下にあるブロックBの安定性 - 流向がブロックに対して斜めである場合 ($\beta = 20^\circ$) -

F_{r1} , $1/F_{r2}$ (F_s : 滑動についての安全率, F_{r1} : 流下方向の転動についての安全率, F_{r2} : 法面最大傾斜方向の転動についての安全率)を表わす。縦軸の値が大きい方が安定性が低く, $1/F_s$, $1/F_{r1}$, $1/F_{r2}$ が1以上になったところで対象ブロックが移動を開始する流速となる。この図より, $1/F_s$ の方が $1/F_{r1}$ および $1/F_{r2}$ よりも大きく, 流向がブロックに対して平行な場合と同様に, ブロックの安定性を考える上では, 滑動に対する安定性を考慮すれば十分であると考えられる。単体, ブロック群の最上流端, ブロック群内部を比較すると, $1/F_s$ は単体についての値がブロック群上流端の値より大きく, この傾向は流れがブロックと平行の場合と逆である。これは, 単体で置かれたブロックに対して流れが斜めに作用するとブロックの側面に流れが作用し横力が大きく働くのに対して, ブロック群の最上流端ではブロックの側面は隣り合うブロックに遮へいされ, 流れが斜の場合でも大きな横力が作用しない(3.5参照)ためである。 $1/F_s$ の値を流向がブロックに対し平行な場合と比較すると, 単体の場合には流速2 m/sで1.7倍も大きくなっている。これは横力の作用によるところが大きく, 横力の影響の少ないブロック群上流端やブロック群内部では両者はほぼ同程度の値となる。 $1/F_{r1}$ および $1/F_{r2}$ の値は, ブロック群上流端の値が大きく, 次いで単体の場合が大きく, ブロック群内部の値が最も小さい。 $1/F_s$ の値についてもブロック群内部が最も小さい。これらは, 流向がブロックと平行な場合と同様に, ブロック群内部のブロックの安定性が他に比べて高く, 一方, ブロック群最上流端のブロックは安定度が低く弱点箇所になりやすいことを示している。また, 流向がブロックと平行な場合と同様に, ブロックの安定性を考える上で揚力を無視することができない。

4.3.3 安定性についての考察

4.3.1, 4.3.2で対象にしたブロックのうちブロックAは比較的背の高い形状を持っており, また, ブロックBは上流側の面が直立し, 前述したようにモーメントを受けやすい形状を持っている。このような形状特性を持つブロックについても, 滑動に比べて転動に対する安定性があるかに高いという結果が得られたことから, 流水中において安定な護岸ブロックを設計するにあたっては, 通常, 滑動を想定するだけで十分であると判断できる。またブロックの安定度に与える揚力の影響が大きいことから, ブロックの安定性を考える上で揚力を無視することは適当でない。

4.4 ブロックが流水中で安定であるための必要重量

4.4.1 必要ブロック重量を求める方法

本節では, 流水に対して滑動も転動も起こさないための必要ブロック重量を求める。前節で明らかになったように, 通常の護岸ブロックを対象とする場合, 滑動に対して安定であれば転動に対しても安定となる。そこで, 必要ブロック重量を滑動が生じないための条件から求める。以下に, 滑動が生じないために必要なブロック重量と代表流速との関係を求める式を導く。なお, 本節で取上げる必要ブロック重量は, ある形状を持つブロックを対象にし, そのブロック

の形状を相似にしたまま大きさだけを任意に変えられるとした場合に、どこまでブロックを大きく（したがって、重量を大きく）すれば流水に対して安定になるかという条件から求めるものである。実際には、任意の大きさを持つブロックはないので、本節で取上げる必要重量をそのまま設計に用いることはできないが、ある流速に対してどの程度の大きさのブロックが必要となるかを知る目安となり、また、様々な状況に置かれたブロックの安定性を比較するわかりやすい指標ともなる。

(1) 流向がブロックに対して平行な場合（横力が作用しない場合）

まず（4-1）式より次式が導かれる。

$$W_w \geq [\mu^2 \cdot L + \{\mu^4 \cdot L^2 - (\mu^2 - \tan^2 \theta) \cdot (\mu^2 L^2 - D^2)\}^{1/2}] / [\cos \theta \cdot (\mu^2 - \tan^2 \theta)] \quad (4-7)$$

ここで、（4-7）式のD、Lは（2-3）、（2-4）式より求めることができる。この際必要となる投影面積は、次式によりブロック空中重量と関係付けられる。

$$A_D = \alpha_D \left(\frac{W}{r_b} \right)^{2/3}, \quad A_L = \alpha_L \left(\frac{W}{r_b} \right)^{2/3} \quad (4-8)$$

ここで、W：ブロックの空中重量、 r_b ：ブロックの単位体積当たりの重量、 α_D 、 α_L ：ブロックの形状から決まる係数であり、ブロック形状が相似であればブロックの大きさによらず不変である。以上により、必要ブロック重量（空中） W_c と代表流速との関係を表わす次式が得られる。

$$W_c = \left[\frac{r_b^{1/3}}{r_b - r_w} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left\{ \frac{\mu^2 C_L \alpha_L + \sqrt{(C_D \cdot \alpha_D)^2 (\mu^2 - \tan^2 \theta) + (\mu \cdot C_L \cdot \alpha_L \tan \theta)^2}}{\cos \theta (\mu^2 - \tan^2 \theta)} \right\} \right]^3 \cdot u^6 \quad (4-9)$$

ここで、 r_w ：水の単位体積当たりの重量、である。以上導かれた（4-9）式を用いれば、ブロックの形状から決まる α_D 、 α_L と設計の際想定した状況における A_D 、 A_L および C_D 、 C_L により代表流速と必要ブロック重量との関係を得ることができる。この関係から、想定される外力、すなわち代表流速に応じたブロックの必要空中重量を知ることができる。

(2) 流向がブロックに対して斜めである場合（横力が作用する場合）

（4-4）式より次式が導かれる。

$$W_w \geq \frac{\mu^2 \cdot L + F_s \cdot \tan \theta + \sqrt{\mu^2 (F_s^2 + D^2) + \tan^2 \theta (\mu^2 \cdot L^2 - D^2) + \mu \cdot L \cdot F_s \cdot \tan \theta}}{\cos \theta (\mu^2 - \tan^2 \theta)} \quad (4-10)$$

ここで、（4-10）式のD、L、 F_s は（2-3）、（2-4）、（3-5）式より求めることができる。この際必要となる投影面積は、（4-8）式と（4-11）式によりブロック重量と関係づけられる。

$$A_s = \alpha_s \left(\frac{W}{r_b} \right)^{2/3} \quad (4-11)$$

ここで、 α_s ：ブロックの形状から決まる係数である。以上により、必要なブロック重量 W_c と代表流速との関係を表わす次式が得られる。

$$W_c = \left[\frac{r_b^{1/3}}{r_b - r_w} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\left\{ \mu^2 \cdot \alpha_L \cdot C_L + \alpha_s \cdot C_s \tan \theta + \sqrt{\mu^2 (\alpha_s^2 \cdot C_s^2 + \alpha_D^2 \cdot C_D^2 + \alpha_L \cdot C_L \cdot \alpha_s \cdot C_s \tan \theta) + \tan^2 \theta (\mu^2 \alpha_L^2 \cdot C_L^2 - \alpha_D^2 \cdot C_D^2)} \right\}}{\cos \theta (\mu^2 - \tan^2 \theta)} \right]^3 \cdot u^6 \quad (4-12)$$

以上導かれた(4-12)式を用いれば、ブロックの形状から決まる α_D , α_L , α_s と A_D , A_L , A_s および C_D , C_L , C_s により代表流速と必要ブロック重量 W_c との関係を得ることができる。

4.4.2 種々の状況におかれたブロックの必要ブロック重量

図4-7, 図4-8に、代表として、法面勾配を2割, 法面とブロックとの摩擦係数 μ を0.6とした場合の代表流速とその流水中で安定となるための必要なブロック1個の空中重量 W_c との関係を示す。図からわかるように、必要ブロック重量 W は流速 u の増大とともに急激に大きくなる (W は u の6乗に比例する)。このことは、わずかな流速の増大が必要ブロック重量の急激な増大につながることを示している。また、必要ブロック重量は、ブロック群内部、単体、ブロック群最上流端など設置状況により大きく異なる。

ここで、様々な状況下にあるブロックの安定性をわかりやすく比較するため、代表流速1mの場合の必要空中ブロック重量 W_c を様々な状況にあるブロックについて計算し、比較した。(4-9), (4-12)式からわかるように W_c と u との間には次式で表される関係があり、代表流速1mの場合の必要空中ブロック重量 W_c は次式の係数 a に対応することから、 $u = 1$ m/s の W_c は、種々の状況における護岸法覆工安定化の困難さを表す指標と見ることができる。

$$W_c = a \cdot u^6 \quad (4-13)$$

ブロックA形状, ブロックB形状についての比較の結果を図4-9, 4-10に示す。図から以下のことがわかる。最も標準的な法勾配2割, 流向 $\beta = 0^\circ$ の場合について見ると、ブロック群内部, 単体, ブロック群最上流端の順に W_c が大きくなる。特にブロック群内部と単体との W_c の差は大きく、ブロック群内部を対象にしてブロックの安定化を図ることは、他の条件を対象にするよりもはるかに容易であることがわかる。 $\beta = 0^\circ$ のまま法勾配を0割とすると、ブロック群内部, 単体, ブロック最上流端とも W_c が大きく減少する。このことは、法勾配を小さくすることが流水外力に対する法覆工ブロックの強度増大に大きく寄与することを示している。一方、法勾配を2割のまま $\beta = 20^\circ$ にすると、最上流端ブロックの W_c はあまり変化しないの

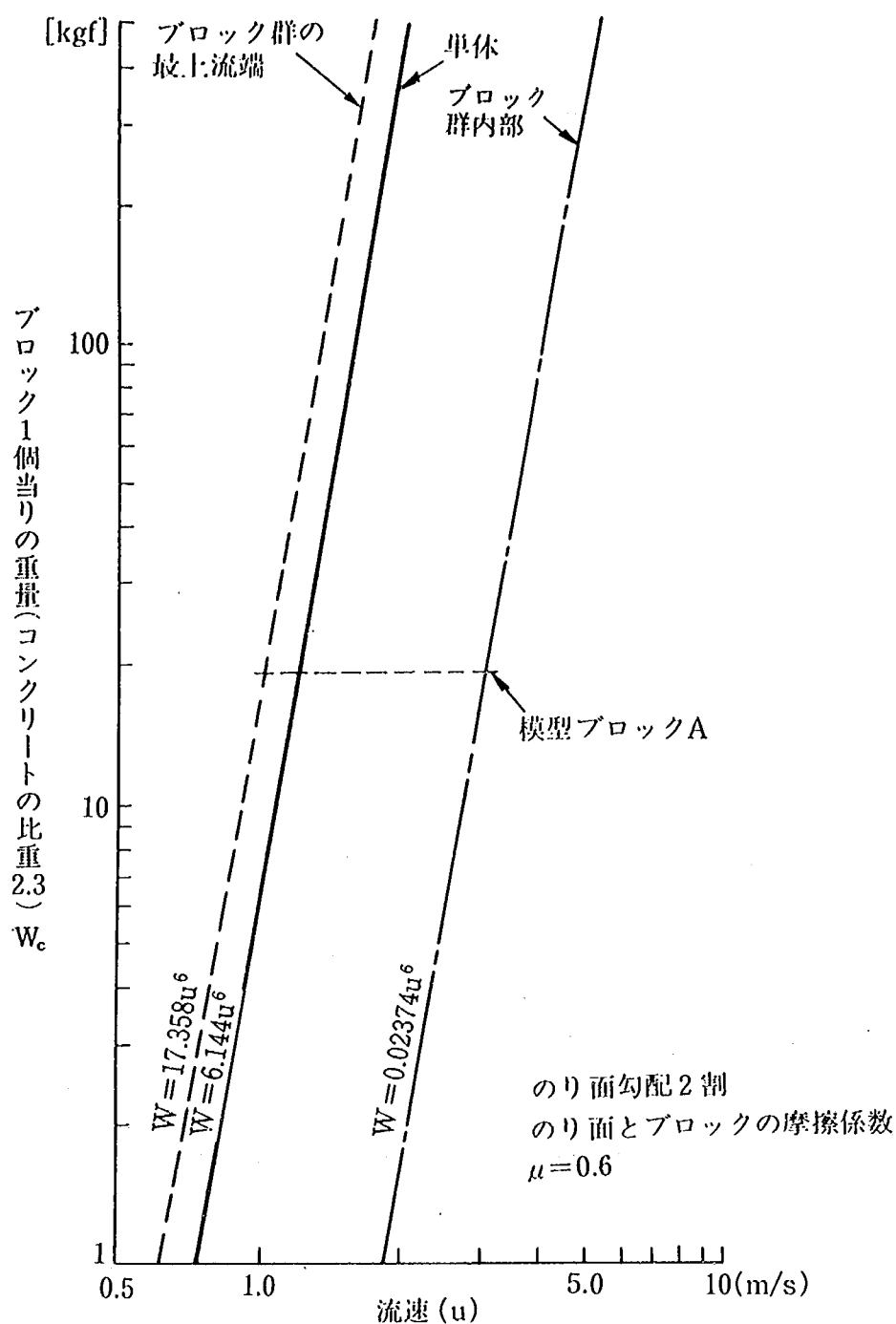


図4-7 流水中で安定なために必要なブロック重量
(ブロックA形状)と流速との関係

に対して、単体ブロックの W_0 は大きく増大する。これは、前述したように、単体ブロックに対しては β が増大すると大きな横力がブロックを法面下へ引きずる方向に作用する一方、最上流端ブロックの場合 β の増大にともなう横力の増大がほとんどないからである。以上のことは、単体ブロックを対象にする場合、2次流などによる流向の傾きの存在がブロックの安定性を大きく損い、設計上流向の傾きの影響を無視できないことを示している。ブロックAについては、最上流端ブロック下が洗掘された場合の W_0 が示されている。洗掘のタイプや洗掘量によって

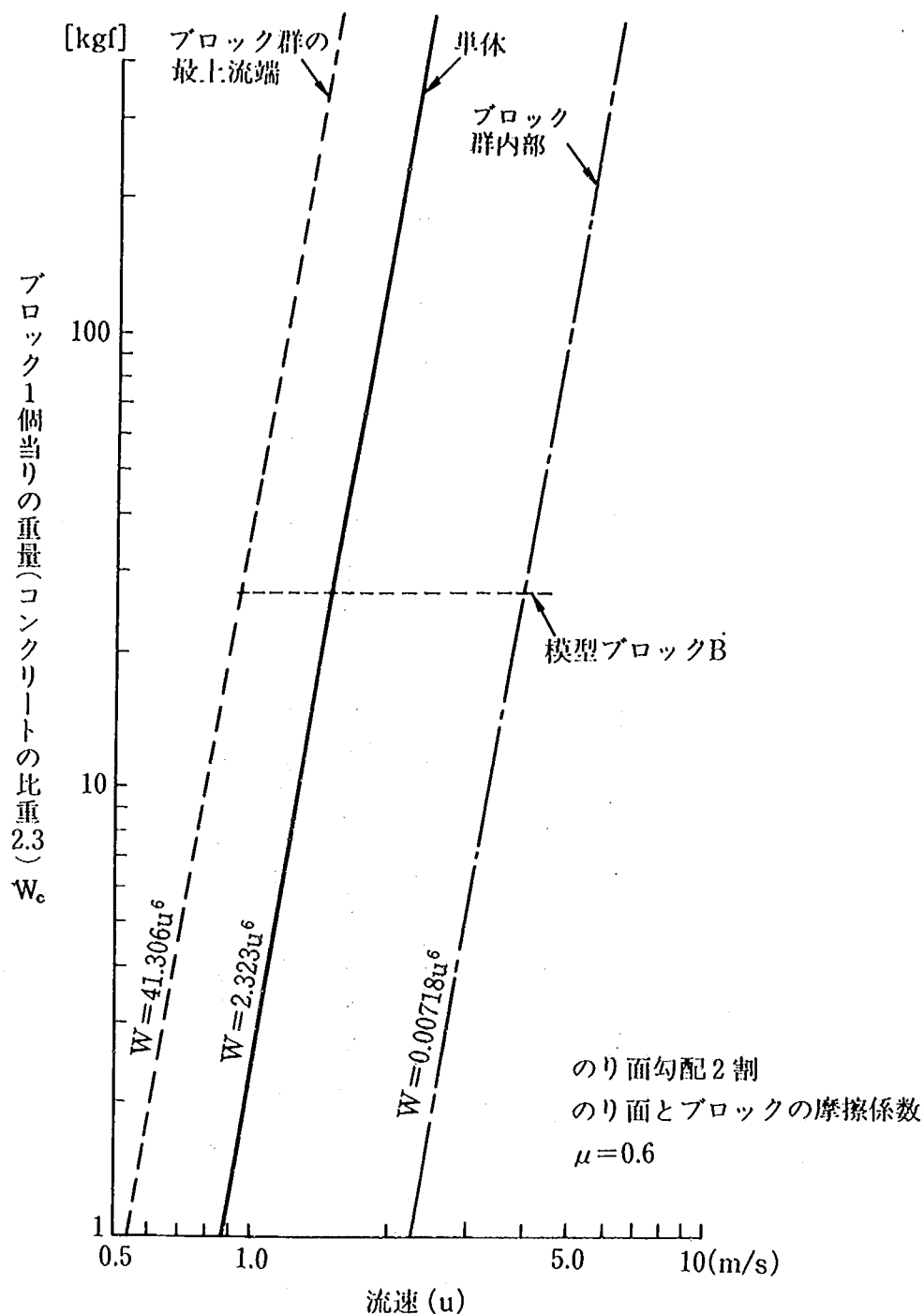


図4-8 流水中で安定なために必要なブロック重量 (ブロックB形状) との関係

値は異なるが、いずれも洗掘を受けない場合の W 。より大きくなっており、最上流端ブロック下の洗掘は、ブロックの安定化を困難にすることがわかる。このことは、連節ブロックにおいて上流端部を保護することの重要性を示している。

以上のように、流水中でのブロックの安定を確保することの困難さは、ブロックの置かれた状況によって大きく異なる。したがって、流水中で安定なブロックを設計するに当たっては、どのような状況にあるブロックを想定するかが設計の結果に大きく影響する。

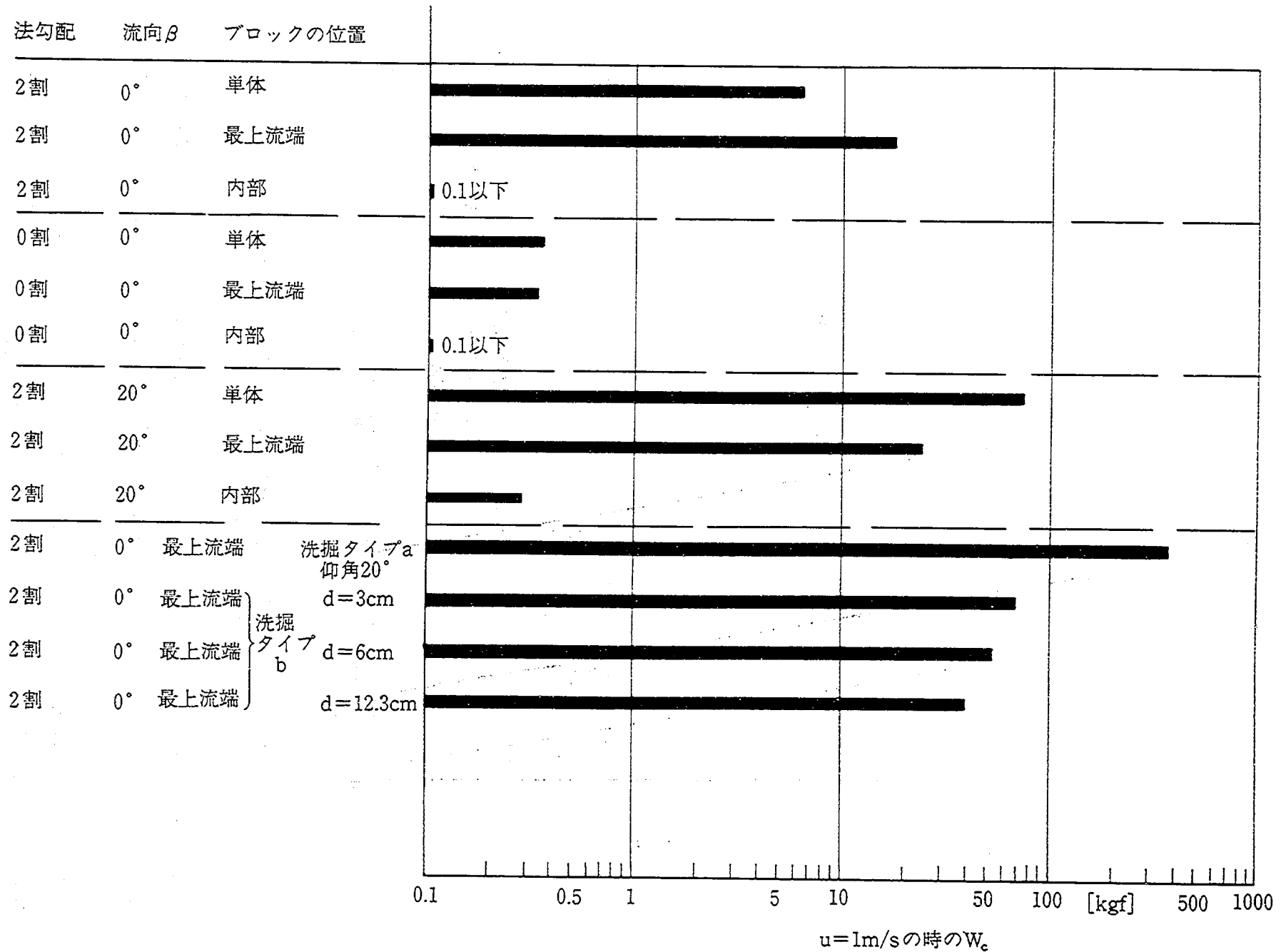


図4-9 種々の状況に置かれたブロックの安定性の比較(ブロック形状A)

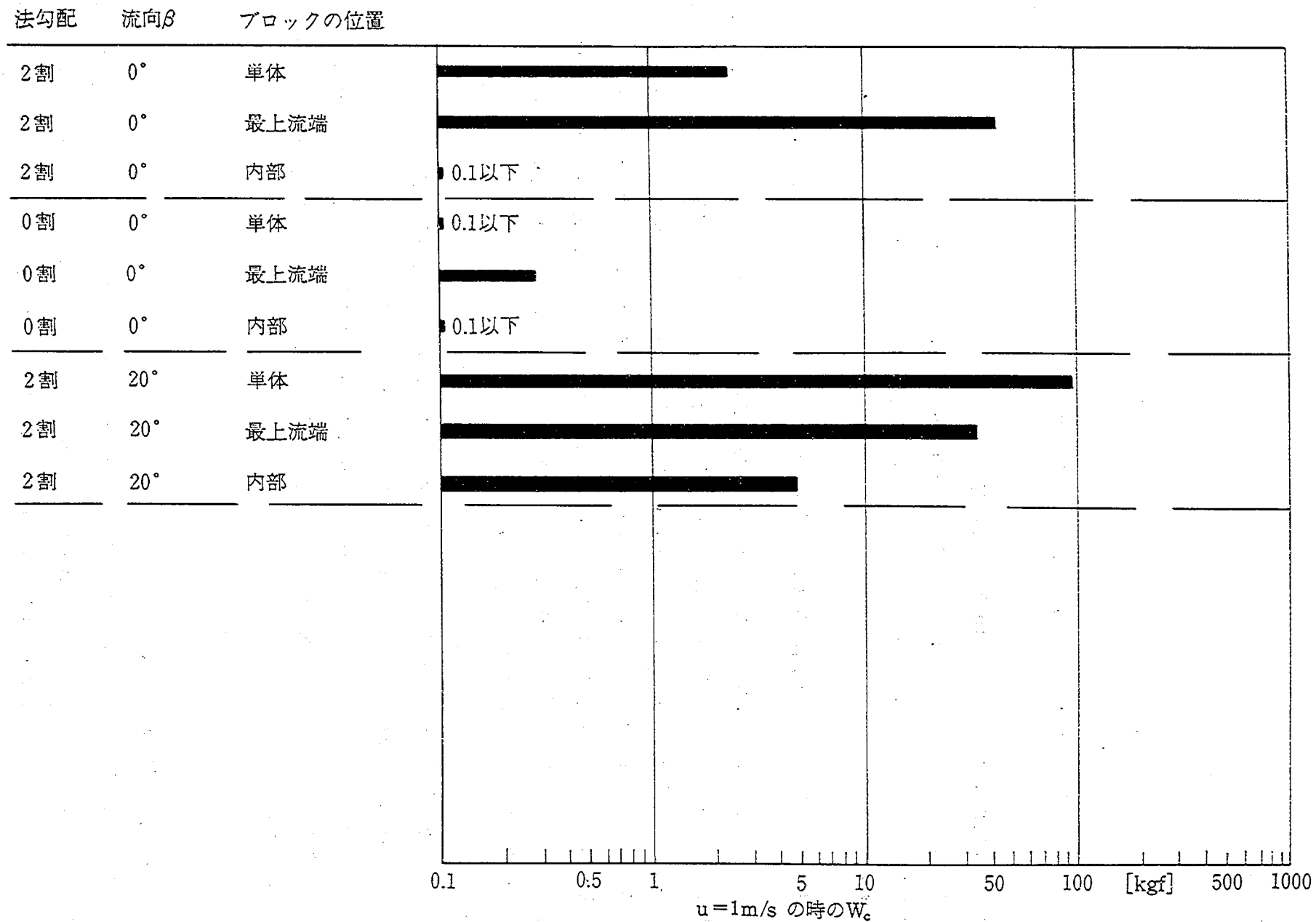


図 4 - 10 種々の状況に置かれたブロックの安定性の比較 (ブロック形状 B)

第 5 章 護岸法覆工の流速低減効果

5.1 概 要

護岸法覆工表面の流速低減効果が小さい場合、護岸工を施工したことによってかえって護岸工近くに流水が集中し、護岸工自身あるいはその上下流の護岸工未施工区間で洗掘をまねく恐れもある。したがって護岸法覆工表面には、適度な諸元を持つ粗度を配置し、洪水時の堤防近傍の流速を低減するとともに河床洗掘の防止をはからなくてはならない。そこで、本章では護岸法覆工表面の粗度が持つ流速低減効果の特性について検討する。

5.2 流速低減効果を表す相当粗度 K_s について

従来より、流速低減効果の指標としては相当粗度 K_s が用いられてきた^{8), 9)}。この水理的意味は次の通りである。広長方形断面の開水路の鉛直平均流速 v は以下の式で表わすことができる。
(注 1 参照)

$$v/u_* = 6.0 + 5.75 \log_{10} (h/K_s) = (6.0 + 5.75 \log_{10} h) - 5.75 \cdot \log_{10} K_s \quad (5-1)$$

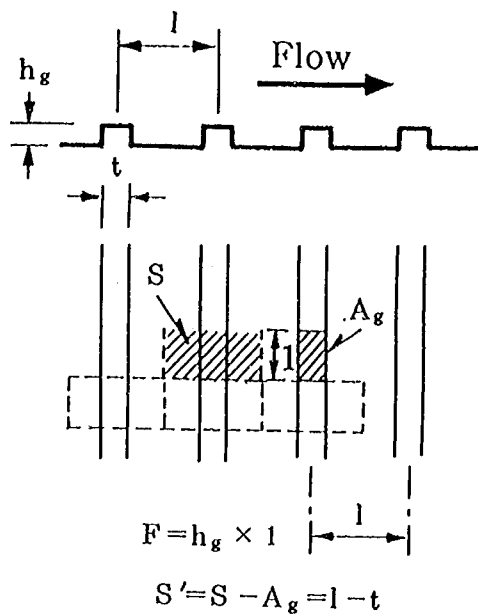
ここで、 v : 鉛直平均流速、 h : 水深、 u_* : 摩擦速度 $[(\tau/\rho)^{1/2}]$ 、 K_s : 相当粗度 (長さの次元を持つ) である。一般に h 、 u_* (せん断力) は施工箇所における河道の特性から概略決定されるものであり (6.3.2 参照)、一方、 K_s は、護岸法覆工の粗度形状によって決まるものである。(5-1) 式から、 K_s が大きい程 v が小さくなり、 K_s によって粗度の持つ流速低減効果が表わされることがわかる。本研究においても、法覆工表面の相当粗度 K_s を流速低減効果の指標と考え、既往の実験結果と著者らが行った風洞実験結果とを合せて、 K_s と粗度形状との関係を一般的に表現する方法について検討した。

注 1) 実際に護岸が施工されるのは法面であることから、広長方形断面開水路の流速分布をそのまま法面近傍の流速分布に適用することはできない。ここでは K_s と流速低減効果との関係をわかりやすく示すことに重点を置いて、広長方形断面開水路の流速分布をもとに K_s の意味を説明した。これは、 K_s の持つ本質的な意味が広長方形断面でも法面近傍でもかわらないと考えられるからである。

5.3 実験方法及び実験ケース

法覆工表面の粗度 (流速低減効果を支配する凸部分の形状) は図 5-1 に示すように棧型と突起型に分けられる。以下それぞれを棧粗度、突起粗度と呼ぶ。これら 2 つの粗度形状を法覆工の種類から見ると、棧粗度は法枠工に、突起粗度は前章で使用した連接ブロック工や張ブロック工等に相当する。ブロック A、B が敷き詰められた場合の表面形状は突起型粗度に相当し、その相

〈棧型粗度要素〉



〈突起型粗度要素〉

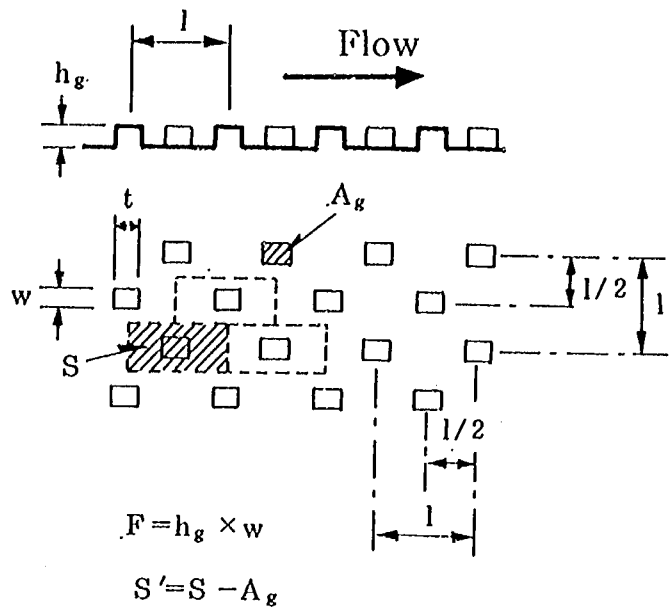


図 5 - 1 粗度形状の分類

当粗度は 3.4.2 で既に求められている。しかし、このデータだけでは、粗度形状と相当粗度との関係についての一般的な議論はできない。そこで、A 風洞を用いて、棧、突起 2 種類の粗度形状の諸元と流速低減効果との関係を把握するための実験を行った。実験においては、ほぼ直方体の形状を持つブロック B を粗度要素として平坦な風洞底面に種々の形に配置することにより、種々の諸元を持つ粗度形状を再現した。図 5 - 2 に風洞内の粗度要素配置方法を、写真 5 - 1 に粗度要素を配置した時の状況を示す。実験では、粗度を設置した範囲の下流端近くの粗度要素 1 個（B ブロック 1 個）の直上位置、その粗度要素とその隣の粗度要素の中間の位置で、底面と直交する方向の風速分布を計測した。なお、粗度要素の数が多い場合には模型ブロック B の数量が不足したため、それとほぼ同じ形状を持つコンクリート製ブロック（ $12 \times 19 \times 39$ cm）を上下流端に設置した（その一例が図 5 - 2 の上の図の斜線ブロックで示されている）。

実験ケースの一覧表を表 5 - 1 に示す。ケース II では棧粗度について風速 25 m/s のみで行い、ケース III のシリーズでは突起粗度について風速 10, 15, 20, 25 m/s の 4 風速で行った。図 5 - 1 に示すように、 l は粗度要素の間隔、 S は、粗度要素一個が受持つ面積、 S' は粗度要素 1 個が受持つ面積から真上から見た粗度要素 1 個の面積を除いたもの、 F は流れ方向から見た粗度要素 1 個の投影面積である。なお、棧の場合には、 S , S' , F を単位幅当たりで考える。 S'/F は、後述するように、水理的観点から粗度の形状特性を表す指標となることから、棧、突起それぞれについて、 S'/F を変えて実験を行っている。

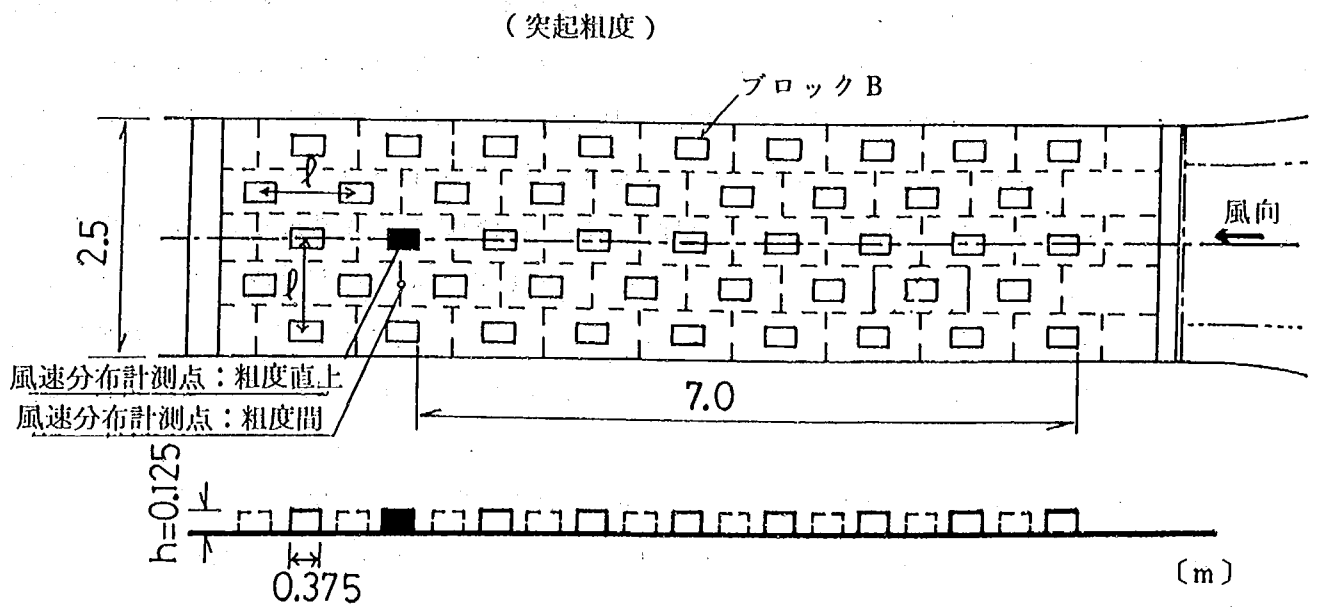
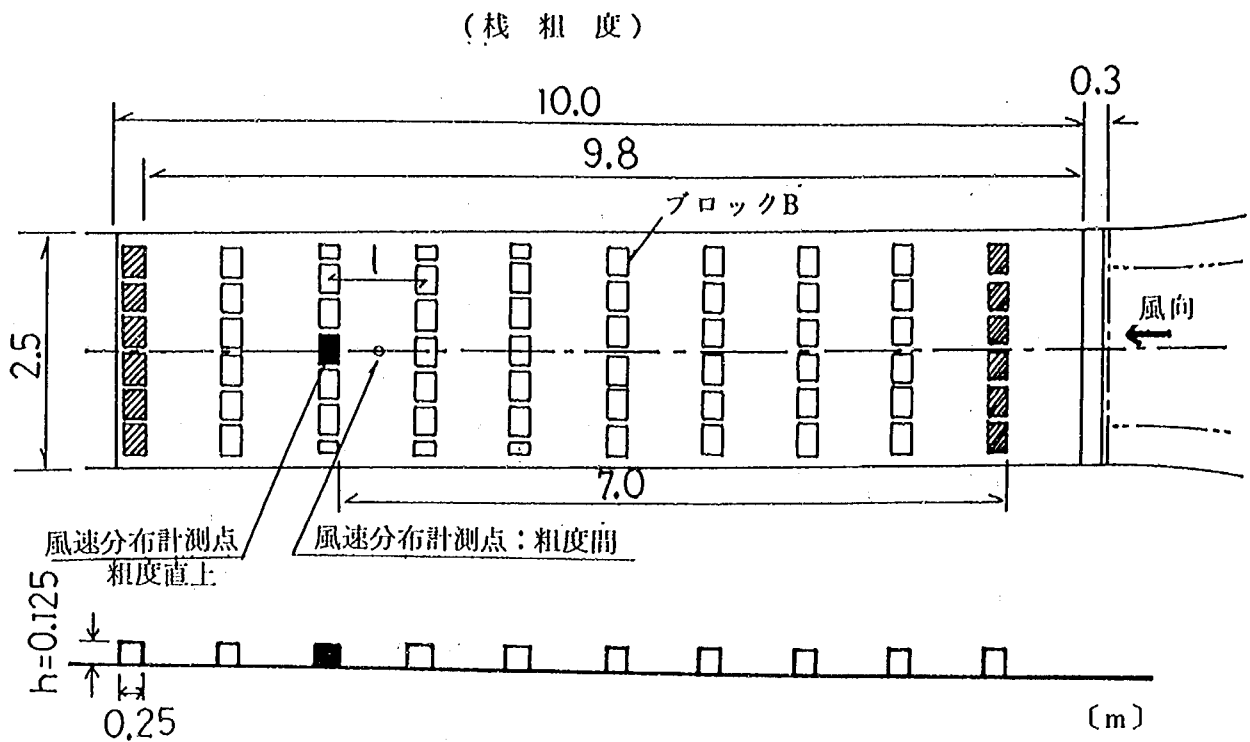


図 5 - 2 粗度ブロックの配置方法

a) 栈 粗 度



b) 突起粗度

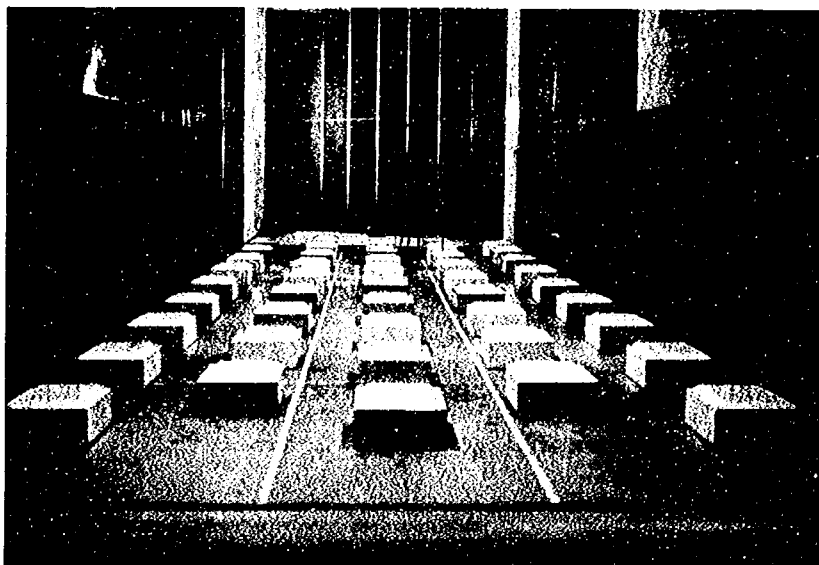


写真 5 - 1 粗度要素を A 風洞底面に設置した時の状況 (手前が風上側)

表 5 - 1 流速低減効果の実験ケース一覧表

ケース番号	粗度配列	ブロックの間隔 $l : (m)$	[粗度 1 個が受け持つ面積 S - 真上から見た粗度の投影面積 Ag] $S' (m^2)$	S'/F
II - 1	栈粗度	0.50	0.25 (幅 1 m)	2
II - 2	"	1.00	0.75 (")	6
II - 3	"	1.50	1.25 (")	10
II - 4	"	2.00	1.75 (")	14
II - 5	"	2.50	2.25 (")	18
III - 1	突起粗度	0.75	0.1875	6
III - 2	"	1.00	0.4063	13
III - 3	"	1.50	1.0313	33
III - 4	"	2.00	1.9063	61

5.4 相当粗度 K_s と粗度形状との関係

前節に示した風洞実験により得られた流速の鉛直分布から、相当粗度 K_s を求めた。 K_s の算出は次のように行った。まず、栈粗度について、足立により行われている粗度形状と対数則の原点位置との関係についての検討結果¹¹⁾を参考にして本実験における各粗度形状の対数則原点位置を与え、突起粗度については突起高さのほぼ半分の高さの位置を原点位置とした。以上の原点位置に基づいて、測定した流速分布に対数則を当てはめるという通常の方法により K_s を求めた。流速には、隣り合う 2 つの粗度の中間で測定した値を用いた。3.4.2 に示した方法を用いなかったのは、本実験においては、風洞底面すべての場所で抗力を測定していないことから、力の測定結果から u_* を求めることができないからである。得られた相当粗度 K_s を表 5 - 2, 5 - 3 に示す。表には、 K_s で用いた原点位置でも合せて示されている。以下、栈粗度と突起粗度に分けてそれらの諸元と K_s との関係について検討する。

表 5 - 2 栈粗度の相当粗度 K_s

ケース番号	S'/F	原点位置 $y_o (m)$	$K_s (m)$	K_s/h_g
II - 1	2	0.1083	0.191	1.526
II - 2	6	0.0625	0.272	2.174
II - 3	10	0	0.607	4.856
II - 4	14	0	0.675	5.398
II - 5	18	0	0.249	1.992

表 5 - 3 突起粗度の相当粗度 K_s

ケース番号	S'/F	流速 (m/s)	原点位置 y_0 (m)	K_s (m)	K_s の平均 (m)	K_s/h_g
Ⅲ - 1	6	10	0.05	0.765	0.507	4.057
		15	"	0.396		
		20	"	0.432		
		25	"	0.436		
Ⅲ - 2	13	10	0.05	0.405	0.331	2.651
		15	"	0.348		
		20	"	0.261		
		25	"	0.312		
Ⅲ - 3	33	10	0.05	0.134	0.112	0.895
		15	"	0.107		
		20	"	0.089		
		25	"	0.118		
Ⅲ - 4	61	10	0.05	0.063	0.054	0.428
		15	"	0.030		
		20	"	0.048		
		25	"	0.073		

5. 4. 1 棧粗度

棧粗度については, Jonassen, Smith and Warren, Johnson, LeRoux, 足立らによって実験が行われ, その結果が Powell¹⁰⁾ によってまとめられている。秋草, 吉川らは, それらのうち棧の高さに対する水深の比が 10 以上のデータを, $K_s/h_g \sim (1-t)/h_g$ 関係に整理している⁸⁾。(h_g : 棧の高さ, l : 棧の間隔, t : 棧の巾) この結果と著者らの実験の結果とを合せて図 5 - 3 に示す。図の縦軸は, K_s/h_g である。これは, 粗度高さ h_g に対する K_s の大きさを表わし, この値が大きい程, 小さい高さの粗度で大きな K_s を得ることができる。横軸は, (S'/F) であり, 粗度諸元を表わす代表パラメータである。棧粗度の場合の S'/F は, 棧間隔(l)から棧の幅 t を引いたもの $(l-t)$ と棧の高さ(h) との比に等しい。なお図中に示した各実験データは, 棧の高さと幅(t) の比 (t/h) が異なっている。図 5 - 3 より, K_s/h_g は, t/h_g が異なっても, S'/F によりほぼ一意的に表されることがわかる。 K_s/h_g のピーク値は 5 - 6 をとり, この時の S'/F は従来から言われるように 10 ~ 15 付近である。

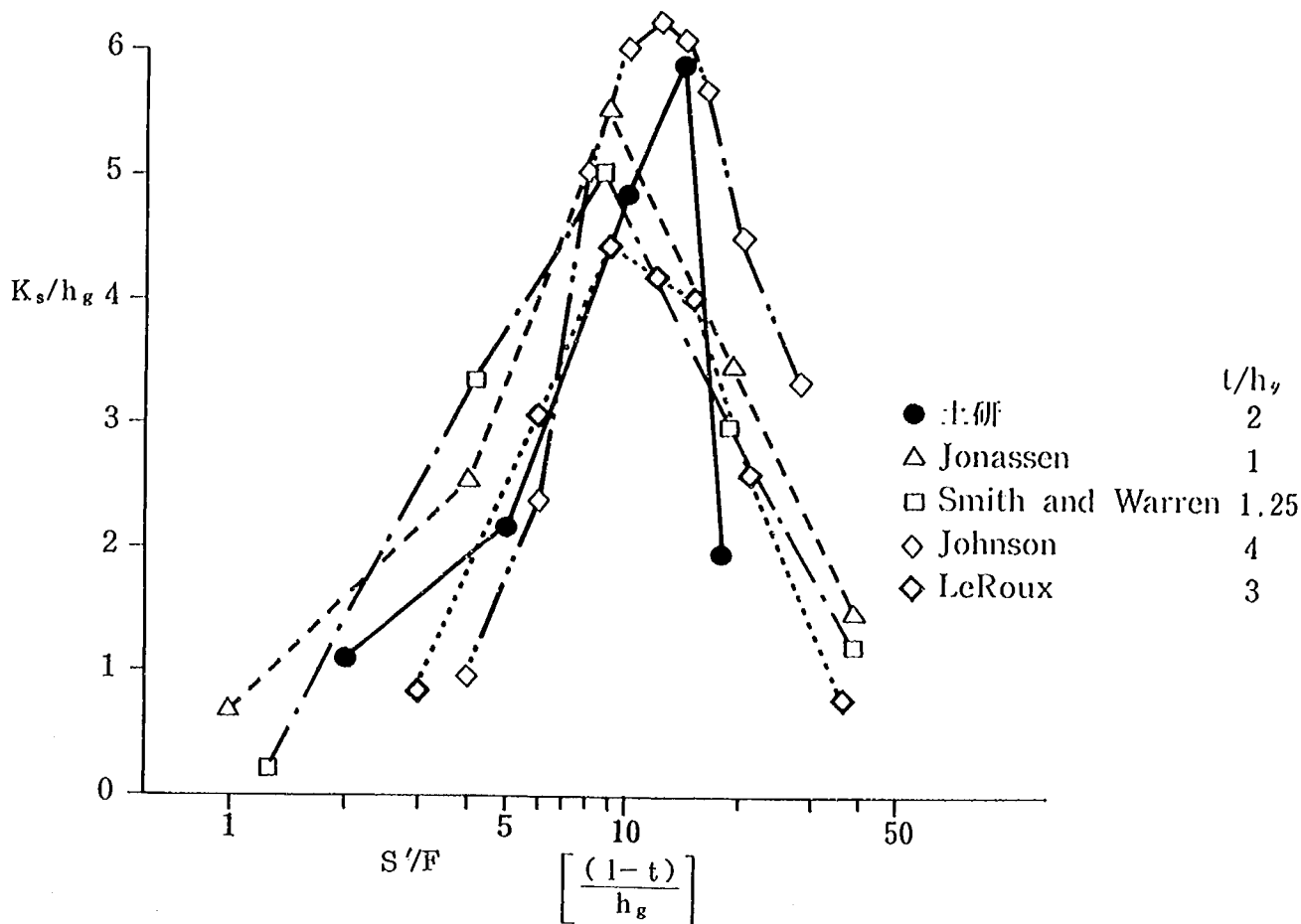


図 5 - 3 $K_s/h_g \sim S'/F$ 関係 (棧粗度)

5. 4. 2 突起粗度

突起粗度については、足立¹¹⁾、小川⁹⁾らが K_s/h_g を S/F により表現することを検討している。しかし、Schlichting の半球、球、L 型鋼を用いた実験結果¹³⁾と著者らの直方体の突起についての実験結果を用いて $K_s/h_g \sim S/F$ 関係を整理すると、図 5 - 4 のように突起形状によるばらつきが大きくなり、特に、粗度形状の設計に重要な K_s/h_g が大きくなる S/F の小さい領域で顕著である。これは、 S/F を用いた整理法が主に S/F の大きい領域を対象にしており、 S/F が小さくなると、ブロック間の隙間の部分が小さくなることの影響が卓越してくるからである¹²⁾。そこでここでは、 S の代りに $S' = (S - A_g)$ (A_g : 真上から見た突起 1 個の面積) を用い、上記のデータを $K_s/h_g \sim S'/F$ 関係に整理した。(図 5 - 5 参照) 図より、突起形状が他と大きく異なる L 形鋼と半球を除いて見ると、図 5 - 4 に比べばらつきが小さくなり、突起粗度の形状を表わすパラメータとして S'/F を用いた方が良いことがわかる。 K_s/h_g のピーク値とその時の S'/F は、棧粗度の場合よりも小さい。以上より、棧粗度、突起粗度それぞれについて、 K_s/h_g と S'/F というパラメータを用いることにより、相当粗度 K_s と粗度形状との関係が図 5 - 3、5 - 5 に示すようにほぼ一意的に表現できることが示された。

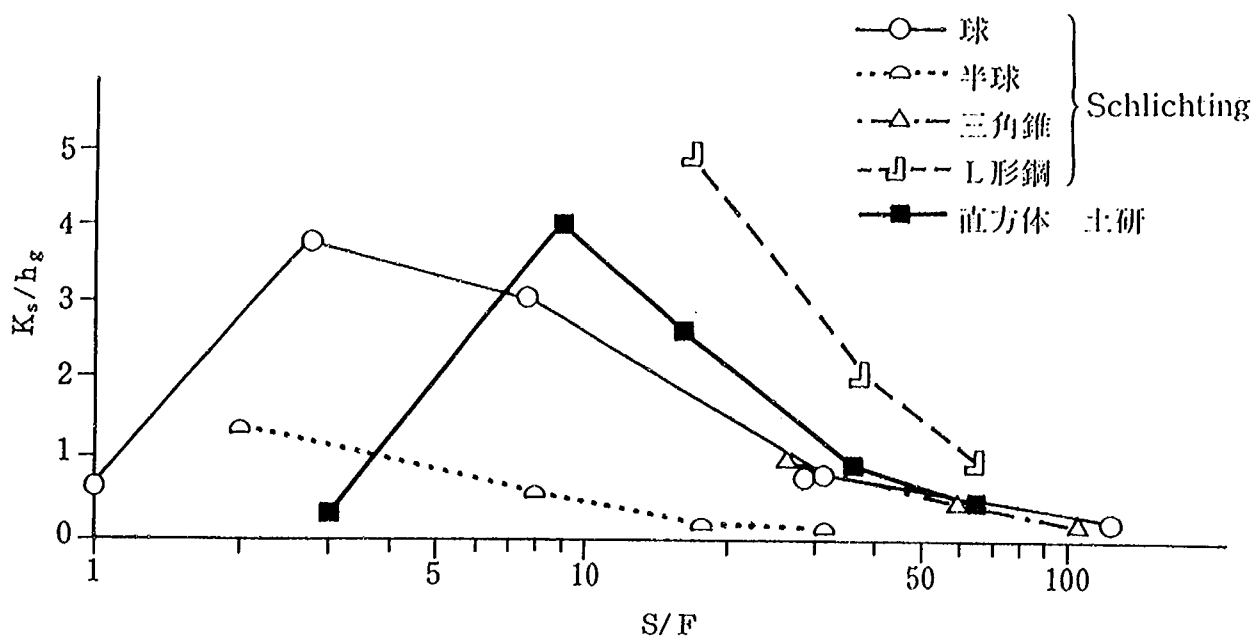


图 5 - 4 $K_s/h_g \sim S/F$ 關係 (突起粗度)

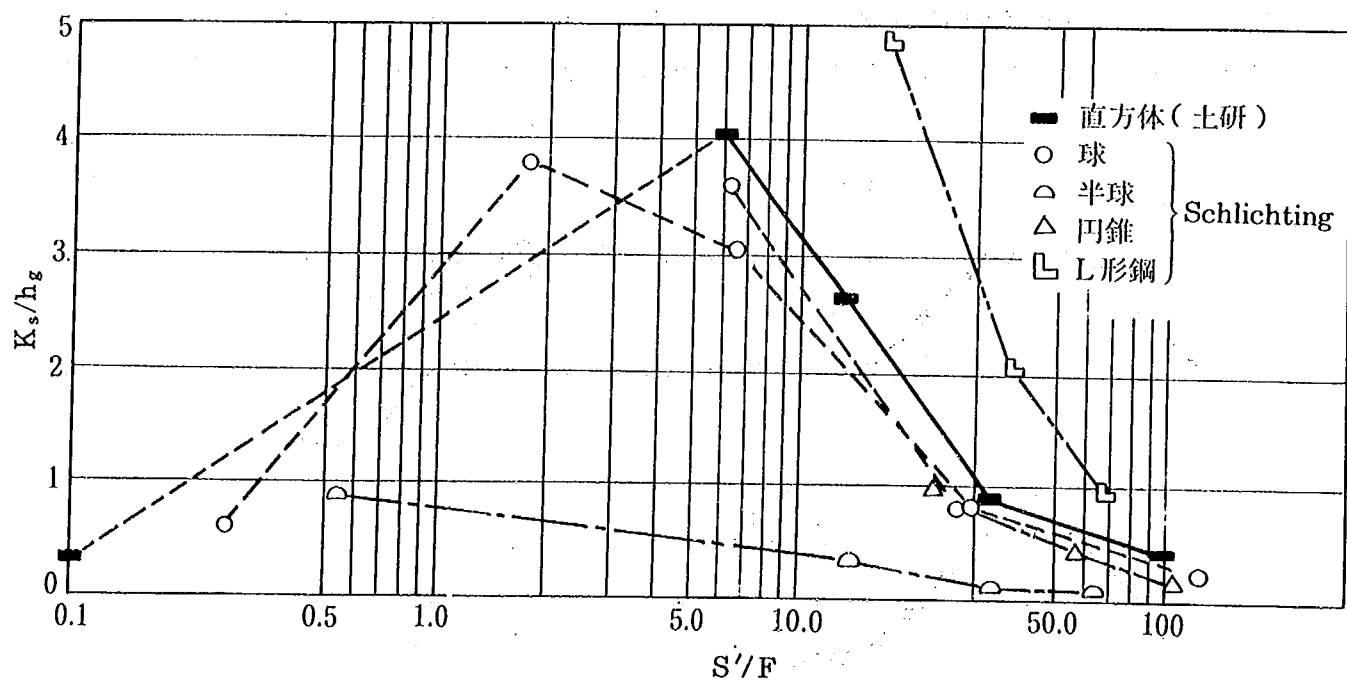


图 5 - 5 $K_s/h \sim S'/F$ (突起粗度)

第 6 章 設計外力の検討

6.1 概 要

護岸法覆工の設計法を検討するに当たっては、設計外力を明確にしておく必要がある。そこで本章では、護岸法覆工の設計に用いるべき外力について検討を行う。

6.2 護岸近傍の平均的な流速 V_0 の算定法

設計外力を求めるには、まず、対象とする護岸工近傍の平均的な流速 V_0 を求める必要がある。ここでは、護岸工近傍の河道諸元とマンニングの式から簡単に求められる基準流速 V_s を求め、次に河道形状に応じた補正係数 α を V_s に掛けることにより（次式） V_0 を求めるという方法をとる。

$$V_0 = V_s \cdot \alpha \quad (6-1)$$

以下に、基準流速 V_s と河道形状に応じた補正係数 α を求める方法を示す。

6.2.1 基準流速 V_s の算定法

基準流速 V_s は、下式により求める。

$$V_s = 1/n \cdot h_d^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \quad (6-2)$$

ここで、 n ：護岸工近傍の河床のマンニングの粗度係数、 h_d ：護岸工近傍の水深、 I_e ：計画規模洪水発生時の対象区間のエネルギー勾配である。 n には、高水護岸（図 6-1 a））を対象にする場合には高水敷の粗度係数を、また低水護岸（図 6-1 b））を対象にする場合には

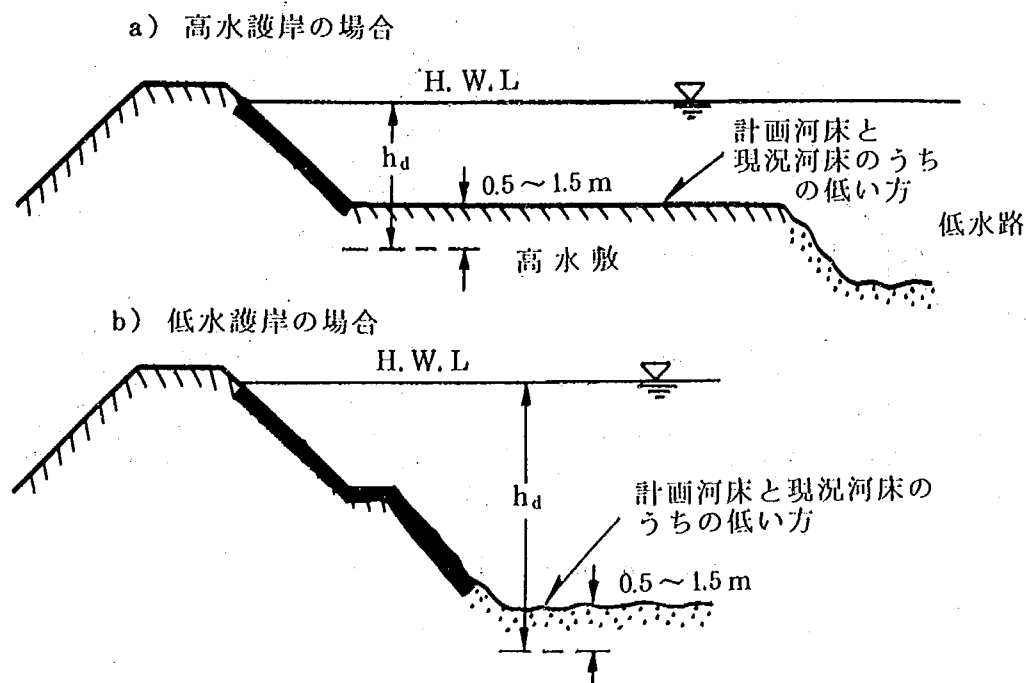


図 6-1 設計水深 h_d の標準的な求め方

低水路の粗度係数を与える。実際の計画粗度係数よりも粗度係数値が小さくなる場合もあり、このことは護岸工の設計にとっては危険側を意味するので、設計に用いる低水路粗度係数には、河床材料と水理量からの推定値を用い¹⁴⁾、¹⁵⁾、また、高水敷の粗度係数には、整備された後の地被状態（背の低い草地、グラウンド等）を想定した値（0.025程度が目安）を用いる¹⁶⁾。 h_d 算定の基準となる河床高には、河川砂防技術基準（案）設計編において示されている護岸基礎工天端位置、すなわち現況及び計画河床のうち低い方からさらに0.5～1.5 m下がった位置の高さを用いる。（図6-1参照） I_0 は、通常の不均衡流計算から求める。以上により得られる流速 V_0 は、河道法線が直線に近く河道断面が単断面であれば、そのまま代表流速として用いることができる。しかし、断面形が複断面であったり、河道法線が湾曲していたり、対象地点が水衝部である場合などには、補正を行う必要がある。その補正係数 α の値について、以下で検討する。

6.2.2 α 値の算定

(1) 低水護岸の場合

a) 当該地点が湾曲部の外岸に当たっている場合

$$\alpha = B/R + 1 \quad (6-3)$$

B ：川幅， R ：湾曲の曲率半径

b) 当該地点が砂れき堆による水衝部に当たっている場合

$$\alpha = D/2H + 1 \quad (6-4)$$

D ， H については図6-2を参照。

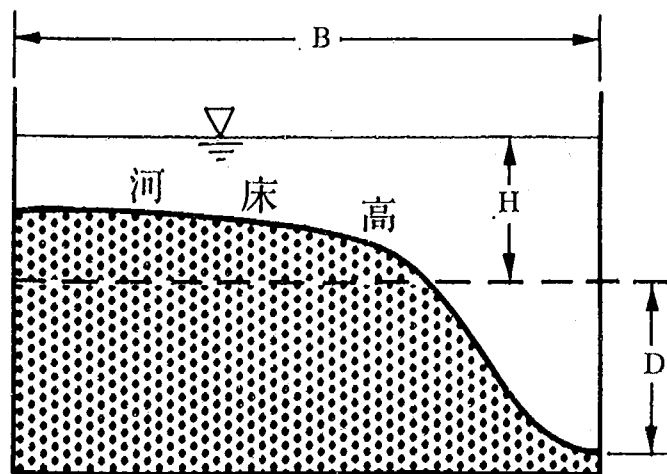


図6-2 D ， H の定義

c) 上記以外の場所では， $\alpha = 1.0$

(2) 高水護岸の場合

a) 高水敷幅が h_d の 10 倍以下の場合

$$\alpha = \frac{1 + \left(\frac{n_{fp}}{n_{mc}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{h_{mc}}{h_{fp}}\right)^{1/3}}{\left(\frac{n_{mc}}{n_{fp}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{h_{fp}}{h_{mc}}\right)^{1/3} + 1} \quad (6-5)$$

h : 水深, 添字 mc , fp : それぞれ低水路, 高水敷を表す。

b) 高水敷幅が h_d の 10 倍より大きい場合 $\alpha = 1.0$

6.3 設計せん断力、設計流速の算定法

V_0 は護岸工近傍の平均的な流速であり, これをそのまま護岸法覆工の設計外力とすることはできない。 V_0 から, 護岸法覆工に作用するせん断力 (以後, 設計せん断力 τ_d と呼ぶ), 護岸法覆工に作用する流体力に直接関係する法覆工近傍の流速 (以後, 設計流速 V_d と呼ぶ) を求める必要がある。これらのうち, 設計せん断力 τ_d は, 次式により近似的に求めることができる。

$$\tau_d = \rho V_0^2 / \{ 6 + 5.75 \cdot \log_{10} (h_d / K_s) \}^2 \quad (6-6)$$

ここで K_s は, 護岸法覆工の相当粗度である。上式は, 相当粗度 K_s を持つ水路に平均流速 V_0 を持つ流れがある場合の水路壁面せん断力を対数則を用いて求めたことに相当する。設計流速 V_d については, 次のように考える。3.4.2 に示したように, 敷き詰められたブロック群の内部にあるブロックに作用する流体力は, 代表流速に相当粗度 K_s の高さの流速を用いることにより算定できることが示されている。設計流速は, 法覆工に作用する力の算定に用いられるものであるから, ここでは, この考え方をそのまま用い, 相当粗度 K_s の高さの流速を設計流速とする。(3-2) 式に $y - y_0 = K_s$ を代入することにより, 設計流速 V_d を求めるための次式が得られる。

$$V_d = 8.5 \times (\tau_d / \rho)^{1/2} \quad (6-7)$$

次章では, 以上に示された設計外力に基づく護岸法覆工設計法について検討を行なう。

第7章 護岸法覆工の設計法に関する検討

7.1 概 要

本章では、今までに明らかになった知見に基づいて、水理的根拠に基づく護岸法覆工の合理的設計法について検討を行う。本研究では、以下に示す2つの条件を満たす護岸法覆工の設計を目標とする。

- ① 流水に対して護岸法覆工が安定である。
- ② 護岸法覆工表面の粗度により、適度な流速低減効果を持つ。

以下の各節において、上記のそれぞれの条件を満たす護岸法覆工の設計法について検討し、最後に、両方の条件を満たす護岸法覆工の設計法を検討する。

7.2 適度な流速低減効果を持つ護岸法覆工表面粗度の設計法

7.2.1 設計の考え方

5章で述べたように、護岸が施工されると、施工前に比べて、また護岸未施工区間に比べて河道が整正されるとともに粗度も小さくなるので、かえって流れが集中し外力が大きくなるということが起こり得る。これを防ぐため、護岸には適当な諸元を持つ粗度をつけて適度な流速減勢効果を持たせなければならない。5.2に示したように、粗度の持つ流速減勢効果の指標としては相当粗度 K_s を用いると便利である。そこで、ここでは、護岸近傍の河床あるいは護岸上下流の芝張堤表面の相当粗度 K_s と同程度の K_s を護岸表面に持たせることを目標とする。法覆工が持つべき相当粗度 K_s の目安を表7-1に示す。芝の K_s は20 cm程度¹⁷⁾であり、また、低水路河床については、砂河川の場合が20 cm程度以下、砂利河川においては80 cm程度以下となる¹⁵⁾。なお、ここで示した考え方は、砂防河川等河床材料が大きく、その河床材料に応じた K_s を持つ法覆工表面の粗度が非常に大きくなる場合には適用できない。これは、このような大きな粗度を付けた護岸構造を流水中で安定にさせることが困難であること、施工が困難であること、さらに洪水時の摩耗などにより大きな粗度を維持することが困難であるからである。したがって、本章では、河床材料がある程度以上大きな河川、具体的には、付けるべき粗度の高さが30 cm程度以上となるような河川は対象としない。

表 7 - 1 法覆工が持つべき相当粗度 K_s の目安

a) 砂河川の相当粗度 K_s

種 別	粒径 (mm)	平坦河床の K_s (m)	砂速の K_s (m)
砂 河 床	0.02	0.0006	0.06
"	0.03	0.0008	0.05
"	0.05	0.001	0.08
"	0.1	0.025	0.15

(文献 15) p 22 ~ 23 より)

b) 砂利河川の相当粗度 K_s

種 別	粒径 (mm) d_{95}	水 深 (m)	K_s (m)
砂 利 河 床	35	4.2	0.9
"	40	3.0	0.6
"	20	2.0	0.4
"	6.5 ~ 15	2 ~ 3.5	0.4
"	15 ~ 25	2.5 ~ 5.0	0.2

(文献 15) p 31 より)

c) 芝の K_s

マンシングの粗度係数	径 深 (m)	相当粗度 K_s (m)
0.03	2	0.18
"	3	0.20
"	4	0.20
"	5	0.20

(文献 17) より)

7. 2. 2 設 計 法

護岸表面の粗度形状を棧型と突起型に分類し、その形状特性を図 5 - 1 のように表現する場合、棧型、突起型それぞれについて、 K_s と粗度形状との関係が $K_s/h_g \sim S'/F$ 関係によりほぼ一意的に表現できることが 5 章において示されている。その結果を用いて、ある K_s の下での粗度の高さ h_g と S'/F の関係を求めると図 7 - 1, 7 - 2 が得られる。この図より、ある K_s を確保するために必要な h_g が最も小さくてすむ S'/F 値 (棧粗度では 12, 突起粗度では 6) が存在することがわかる。この S'/F 値を以後 $[S'/F]_p$ と表わす。 S'/F 値が $[S'/F]_p$ 値から離れるにしたがい、必要となる h_g が大きくなる。図 7 - 3, 7 - 4 は、図 7 - 1, 7 - 2 の関

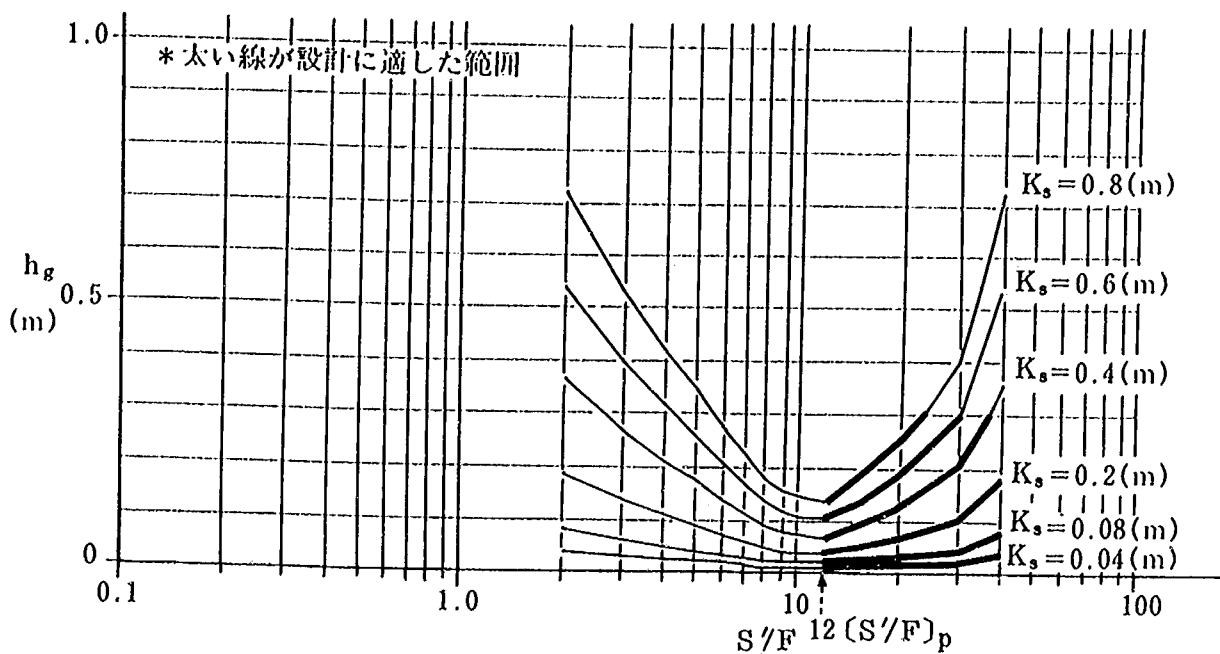


図 7 - 1 栈粗度の $h_g \sim S'/F$ 関係

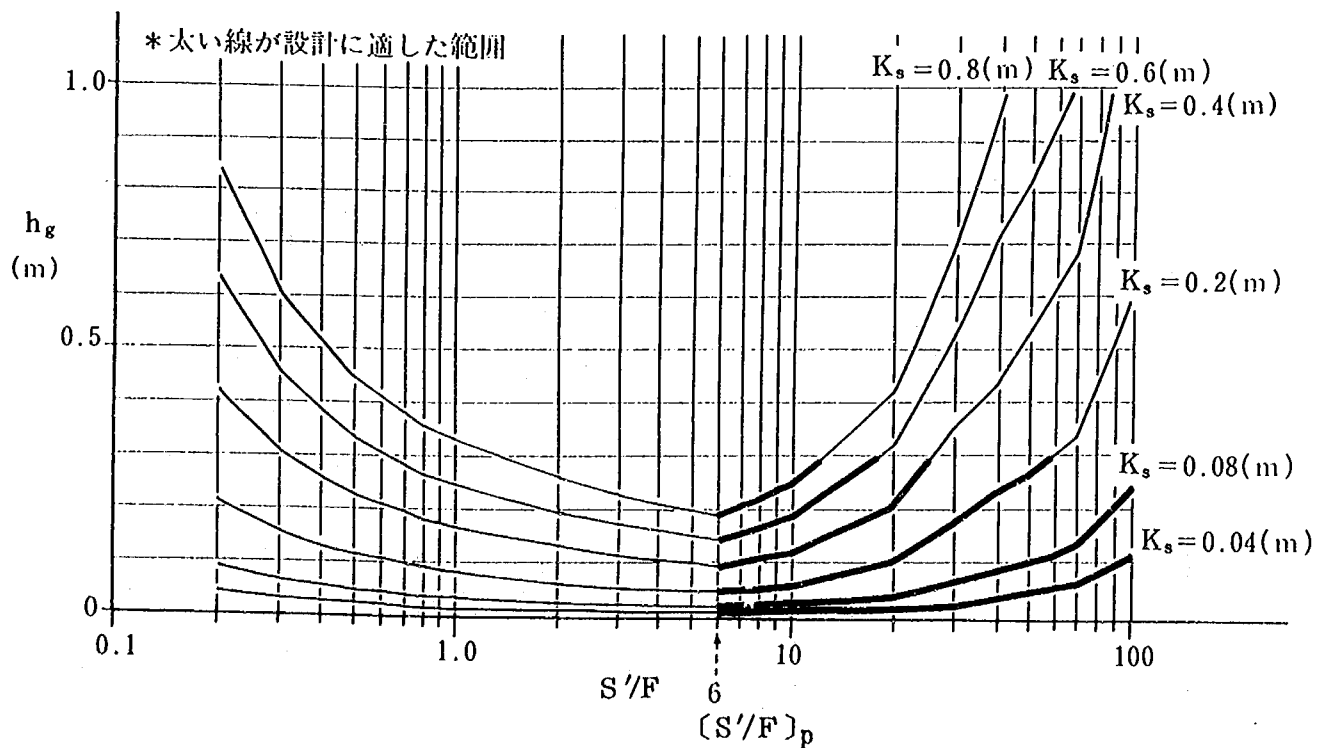


図 7 - 2 突起粗度の $h_g \sim S'/F$ 関係

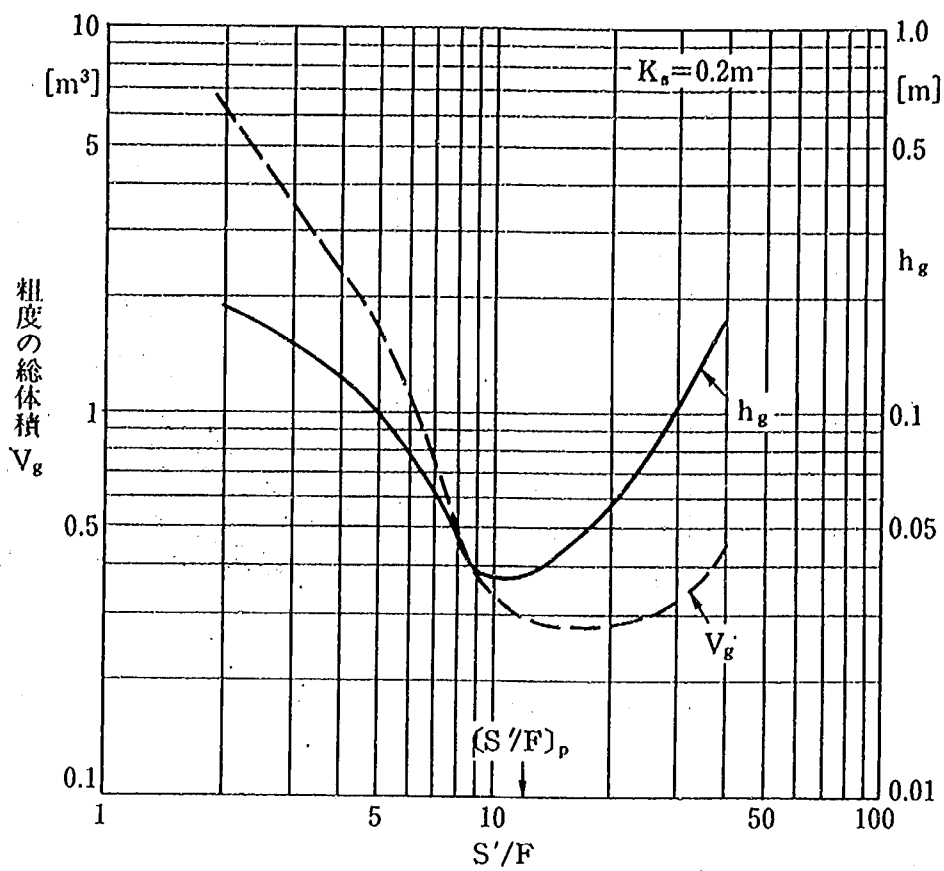


図 7 - 3 法覆工と 100 m^2 施工するために必要な粗度の総体積と S'/F との関係 〈棧粗度の場合〉

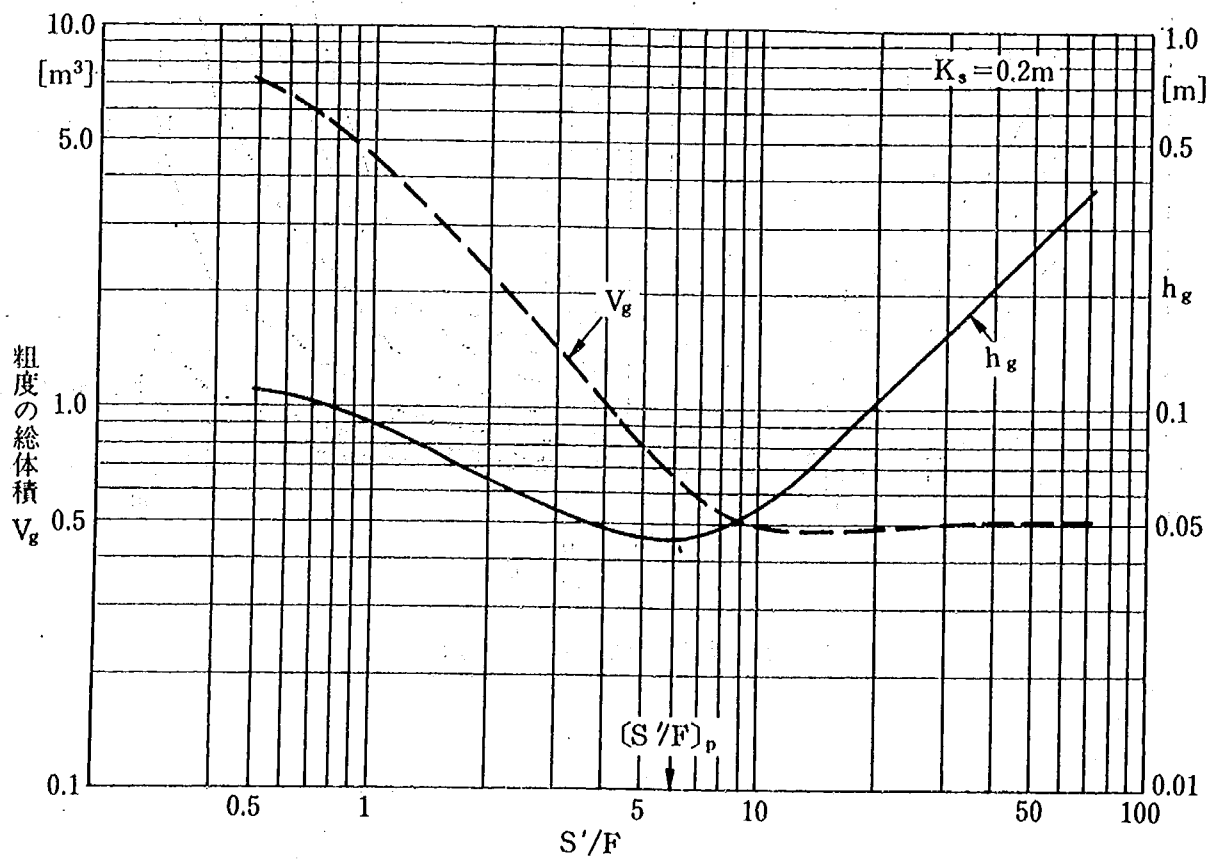


図 7 - 4 法覆工を 100 m^2 施工するために必要な粗度の総体積と S'/F との関係 〈突起粗度の場合〉

係から、代表例として $K_s = 20 \text{ cm}$ を持つ法覆工を 100 m^2 施工する場合に必要な粗度の総体積と S'/F との関係を棧型、突起型粗度について示したものである。図には、参考として粗度高さ h_g と S'/F との関係も示されている。なお、これらの図を作成するに当たっては、棧粗度の幅を高さと同じとし、突起粗度の形状を一辺の長さが粗度高さと同じ立方体としている。図から、 S'/F が $(S'/F)_p$ よりも大きい場合には、ある K_s を確保するのに必要な h_g が大きくなるものの、 S'/F が大きい、すなわち突起や棧の単位面積当たりの数を小さくできるので、 $S'/F = (S'/F)_p$ の場合に比べて必ずしも突起あるいは棧の単位面積当たりの総体積が大きくなるということがわかる。一方、 S'/F が $(S'/F)_p$ より小さくなると、必要 h_g が大きくなる上に単位面積当たりの棧あるいは粗度の数を大きくしなくてはならず、 $S'/F \geq (S'/F)_p$ の場合に比べ必要粗度体積が著しく増大する。今、法覆工本体の厚さを 10 cm と仮定すると、面積 100 m^2 の法覆工本体の体積は 10 m^3 となる。図 7-3, 7-4 からわかるように、 $S'/F \leq (S'/F)_p$ の場合の粗度体積は、この法覆工本体の体積に対して無視できない大きさに達する場合がある。以上のことから判断して、 S'/F を $(S'/F)_p$ より小さくすることは経済的にも施工上も明らかに不利である。したがって、粗度の設計に当たっては、棧型の場合には $S'/F \geq 12$ となるように、突起型の場合には $S'/F \geq 6$ 以上となるように粗度をつけることが望ましい。また、 h_g が大きくなりすぎるとブロックの安定性からも施工上からも不利になるので、 h_g が一定値以下となるように設計することが望ましい。ここでは、その目安として 30 cm 以下を考える。図 7-1 に示した太線は、以上より得られる設計に適した範囲を表わしている。この図を用いることによって、ある法覆工表面粗度が所定の K_s を持ちうるかどうかの検討、所定の K_s を確保するための粗度諸元を求めることができる。

7.3 流水に対し安定な法覆工の設計

7.3.1 設計の基本的な考え方

4.4.2 の結果から明らかになったように、流水中でのブロックの安定性は、そのブロックがブロック群の内部にあり周囲のブロックに遮蔽される状態にある場合と、ブロック群最上流端ブロックと単体ブロックのように流れがブロックに直接作用する状況にある場合とで大きく異なる。ここでは、これら 2 つ状況それぞれが設計上意味を持つと考え、次のような考え方の異なる 2 つの設計法を提案する。第 1 は、護岸が洪水中においても平水時と同じ配置にあると考え、この状態の下での外力に対して法覆工ブロックが安定であるための条件から法覆工ブロックの諸元を求めようとするものであり、これを「通常状態設計法」と呼ぶことにする。この設計法は、ブロック群内部のブロックを想定したことになる。第 2 は、局所洗掘による基礎工の損傷や堤体土の吸出しによって、法覆工の配置が大幅にずれたことを想定し、こうした状態の下で作用する外力に対して法覆工ブロックが安定であるための条件から法覆工ブロックの諸元を求めようとするものであり、これを「極限状態設計法」と呼ぶことにする。この設計法では、後述するように、ブロック群最先端ブロックや単体ブロックを想定している。

7.3.2 通常状態設計法

法覆工の表面には、7.2で述べたように粗度要素が付けられる。通常状態においては、ブロックが整然と配置されているため流水外力は主にこの粗度要素に作用する（4章において、ブロック群内部と呼んだ状況）。1つのブロックが1つの突起を持つ法覆工（図7-5）を例に上げて、ブロックの安定条件を示す。図7-5に示すように、真上から見た法覆工表面の空起

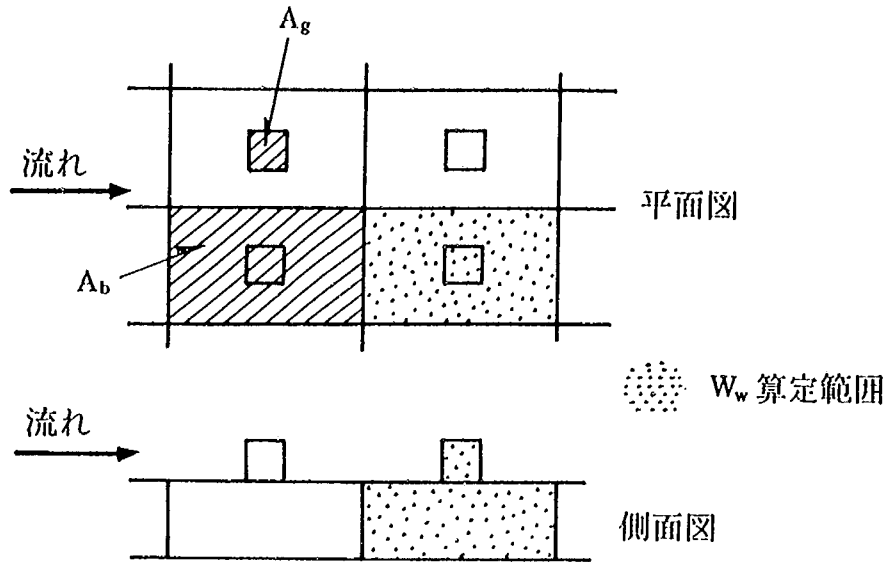


図7-5 A_g , A_b , W_w の算定法（突起型粗度）

1個の面積を A_g 、真上から見たブロック1個の面積を A_b とする。また、ブロック1個の水中重量を W_w とする。4章に示したように、流水中でのブロックの安定は滑動発生の有無により決まる。そこで本設計法では、4章で導いた（4-7）式、すなわちブロックが滑動に対して安定であるための必要重量（水中） W_w 値を求める式を用いる。この式をもう一度示す。

$$W_w \geq \{ \mu^2 \cdot L + \{ \mu^4 \cdot L^2 - (\mu^2 - \tan^2 \theta) (\mu^2 L^2 - D^2) \}^{1/2} \} / \{ \cos \theta \cdot (\mu^2 - \tan^2 \theta) \} \quad (7-1)$$

ここで、 μ ：ブロックとその下の地盤との摩擦係数、 θ ：法勾配である。本設計法において流向の傾き（ β ）を考慮していない上式を用いるのは、3.5に示したように、ブロック群内部のブロックに作用する横力が流れの傾き β の増大によってほとんど増加しないことから、 β の影響を考慮する必要がないと判断したからである。また、上式では、ブロック間の力の伝達が考慮されていない。本設計法で力の伝達を考慮しない式を用いたのは以下の理由による。ブロック間の力の伝達を考慮することは、作用する外力の小さい法面の上方のブロックや基礎工が外力の大きい法面下方部分のブロックを支える状況を許容することを意味する。このような状況は、法覆工全体にとって非常に不安定であり、またこのような状況で法覆工が維持されるためには、ブロック間の力を伝達させるための鉄線や目地、また基礎工の支持力を長期間良好な

状態に維持しなければならず、これは困難である。以上から、ここでは、(7-1)式が想定しているように、個々のブロックが安定条件を満たすように設計を行なう。上式の抗力D、揚力Lは次のように求める。

$$D = \rho/2 \cdot C_D \cdot A_D' \cdot V_d^2 \quad (7-2)$$

$$L = \rho/2 \cdot C_L \cdot A_g \cdot V_d^2 \quad (7-3)$$

ここで、 V_d ：設計流速（6章参照）、 A_D' ：流体力が主に作用する部分の抗力に関する投影面積である。せん断力 τ_d に A_b を掛けたものが抗力Dに等しいという条件と(6-7)、(7-2)式より、 A_D' を求めるための次式が得られる。

$$A_D' = A_b / (36.125 \cdot C_D) \quad (7-4)$$

なお、(7-2)式の代わりに、設計せん断力 τ_d に A_b を掛けたものが抗力Dに等しいことを直接用いた次式を用いることもできる。

$$D = \tau_d \cdot A_b \quad (7-5)$$

Lを求めるのに必要となる C_L には、3章で示したブロック群内部のブロックに関する揚力係数を参考にして決める^{*)}。

設計に当たっては、(7-1)式を満たす諸元を持つよう法覆工ブロックの諸元を決める。なお、栈型粗度を持つ法覆工についても、 A_g 、 A_b 、 W_w を図7-6に示すように算定することにより、同様の検討を行うことができる。

*) 3章では、2種類のブロック形状についてだけブロック群内部の C_L が求められている。粗度の形状や配置が変われば C_L 値も変化することが考えられるので、より正確な設計を行なうためには、より多くの粗度の形状・配置について3章で示した方法により C_L を求める必要がある。ただし、安全側の結果が得られる範囲で実用的かつ簡便な設計を行なうのであれば、 C_L 値として、取りうる範囲の上限値に近いと考えられる1.0程度を与えておけば十分であろう。

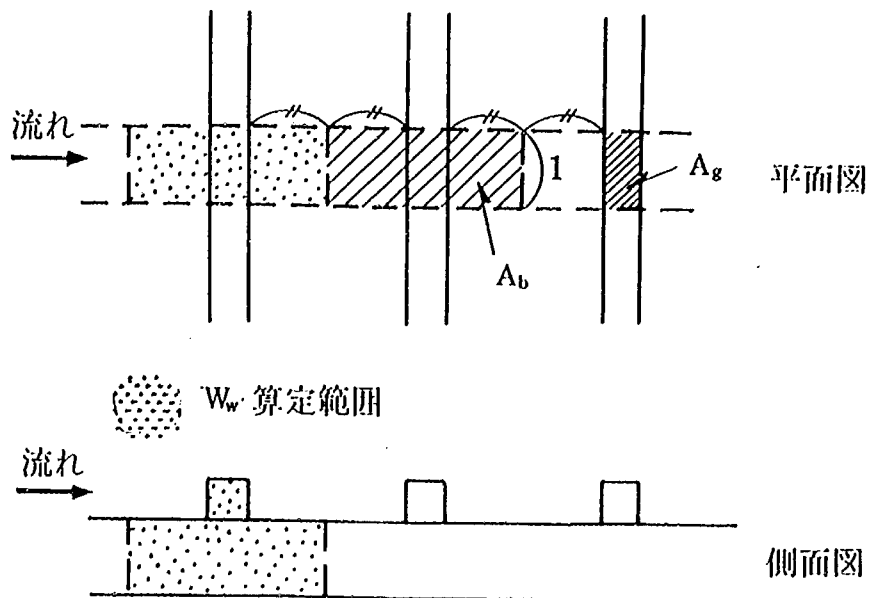


図 7-6 A_g , A_b , W_w の算定法 (棧型粗度)

7.3.3 極限状態設計法

本設計法では、最も厳しい状態、すなわちブロック間の目地や鉄線が機能を失った状態でブロック 1 個全体が突出し、法面に単独で置かれた場合と同じ流水外力が突出したブロック 1 個に作用する状況を想定し、この状態においても突出したブロックが流水に抵抗できるように法覆工ブロックの設計を行う。1 個のブロックの抗力及び揚力の作用する面積をそれぞれ A_D , A_L とする。(図 7-7 参照) 流水中で安定であるための水中重量 W_w を (7-1) 式により求める^{*})。抗力 D , 揚力 L は、次式により求める。

$$D = \rho/2 \cdot C_D \cdot A_D \cdot V_d^2 \quad (7-6)$$

$$L = \rho/2 \cdot C_L \cdot A_L \cdot V_d^2 \quad (7-7)$$

単独で置かれたブロックの C_D , C_L は、3 章の実験結果を参考に決める。

設計に当たっては、(7-1) 式を満たす諸元を持つよう法覆工ブロックの諸元を決める。なお、ここで安定性検討の対象にしたブロックは、広い意味では、法覆工の破壊単位、すなわち法覆工が破壊される場合の 1 個の破壊片と考えることができる。したがって、法枠張などブロックを用いない法覆工についても、想定される破壊単位をブロックに置き換えて上と同様の検討を行うことにより、安定性の検討を行うことができる。

*) 単体のブロックについては 4.4.2 に示したように流向の傾き角 β の増大にともなう安定性の低下が大きいにもかかわらず、通常状態設計法と同じように β を考慮していない (7-1) 式を用いたのは、設定すべき β 値が明確になっていない現段階で、周囲のブロックから支えられない状態でブロック 1 個が突出するという最も厳しい状態を想定した上に β まで考慮することは過大設計になると考えたからである。 β の効果を考慮した設計法を提示するには、実際に、顕著な 2 次流が存在する地点において、法面最大傾斜角方向への力がどの程度の大きさを持っているかを明らかにする必要がある。

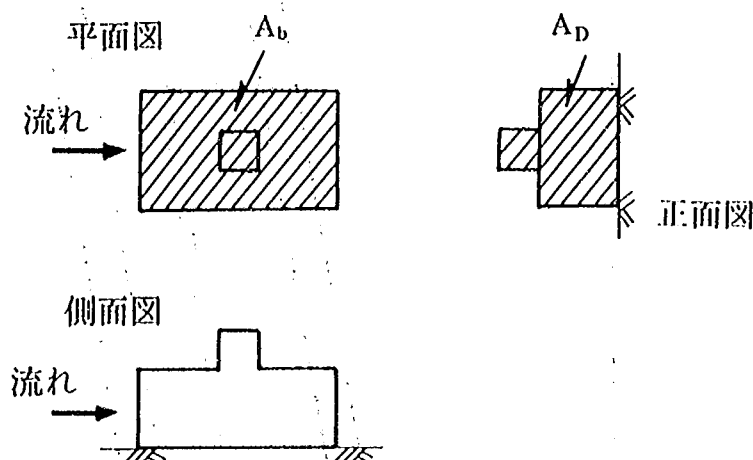


図 7-7 A_D , A_b の算定法

7.3.4 各設計法を適用するに当たっての考え方

通常状態設計法による設計値は、法覆工ブロックが安定であるための必要最小限の条件を用いるものである。一方極限状態設計法による設計値は最も安全側の基準に基づくものである。図 7-8 は、2つの設計法による必要ブロック重量（空中）と設計流速との関係を 3 章の実験において対象にした A, B ブロック形状について比較したものである。図より、2つの設計法による設計値の間にはかなりの差があることがわかる。従来用いられている設計基準との比較を行なうため、Isbash の公式¹⁸⁾、The U. S. Corps of Eng. が推奨している設計式¹⁹⁾による必要ブロック重量（空中）も合せて示してある。これらの公式のうち前者は主に実験により、後者は主に経験に基づいて求められたものである。また、いずれも捨石護岸を対象にしたものであり、護岸の法勾配の影響は式中に明示されていない。以上の式のうち、The U. S. Corps of Eng. の推奨式だけが捨石の比重が 2.64 の場合のものであり、他は、コンクリートの比重 2.3 を用いて計算されている。以上のように、Isbash の公式、The U. S. Corps of Eng. の推奨式とも対象としている護岸の種類や設計条件が本設計法と完全には同じではないので厳密な比較はできないが、図 7-8 から少なくとも、従来の方法による設計値が極限状態と通常状態による設計値の間に位置することがわかる。このことは、極限状態と通常状態 2 つの設計法がそれぞれ最も安全側の設計値と必要最小限の設計値を示すことを裏付けている。実際には、目地コンクリートの存在によりブロック配列の乱れが起きにくかったり、たとえブロック 1 個が突出した場合でも、ブロック同士が鉄線等により結合されているために流失しないですむというように、2つの設計法が想定している状況の中間的な状況が起こりうる。したがって実際に設計を行う際には、当該地点の重要度、護岸が破壊された際の堤防の危険度などから、どの程度まで損傷を受けた法覆工を想定するかを判断し、それに基づいて通常状態設計法による判定を行うか、極限状態設計法による判定を行うか、その中間の考え方をを用いるかを決定する。

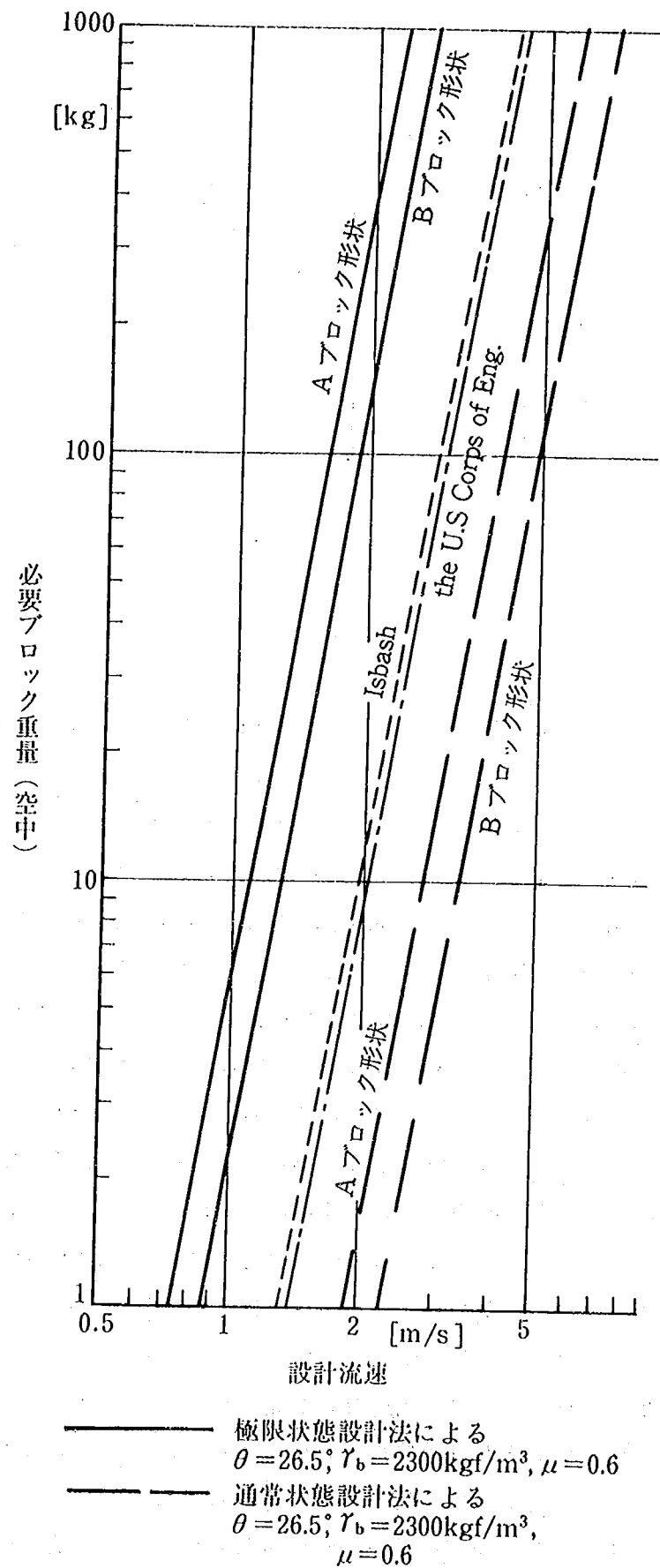


図 7 - 8 2つの設計法による必要ブロック重量 (空中) の比較例

7.4 流水中で安定でありかつ適度な流速低減効果を持つ護岸法覆工の設計法

護岸法覆工は、想定される流水に対して安定であると同時に適度な流速低減効果を持たなければならない。そこで、2、3節で得られた結果を用いて、想定される流速に対して安定であり、しかも必要とされる相当粗度 K_s が確保できる法覆工ブロックの諸元を求め、適切かつ合理的な法覆工ブロック設計法について検討する。

7.4.1 流速及び相当粗度 K_s とブロック諸元との関係

今、法覆工に用いるブロックとして、図7-9に示すように、厚さ d 、面積 A_b を持つコンクリート版の上に高さ h_g の立方体または正角柱の粗度1つを持つ形状のブロックを考える。このブロックが法覆工として用いられたとき上部の突起は、粗度としての役割を果たす。すなわち、正角柱の突起を持つブロックは栈型粗度になり、立方体の突起を持つブロックは突起型粗度となる。一方下部のコンクリート版は、流水による滑動に抵抗する役割を果たす。図7-1、7-2に示した $h_g \sim S'/F$ 関係を用いると、ブロック下部の面積 A_b と h_g 、 K_s との関係が図7-10のように得られる。この図から、 A_b (または h_g) が与えられた時に、所定の K_s となるために必要な h_g (または A_b) を求めることができる。一方、ブロック下部の厚さ d は、与えられた A_b 、 K_s 及び図7-10より求められた h_g の下で、設計流速 V_d に対してブロックが安定

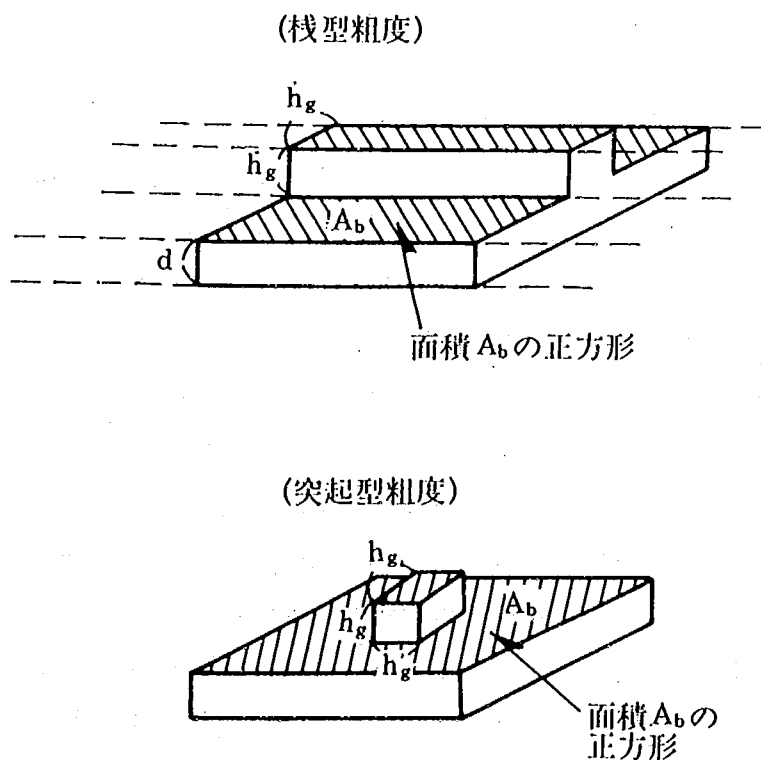


図7-9 設計の対象とするブロック形状

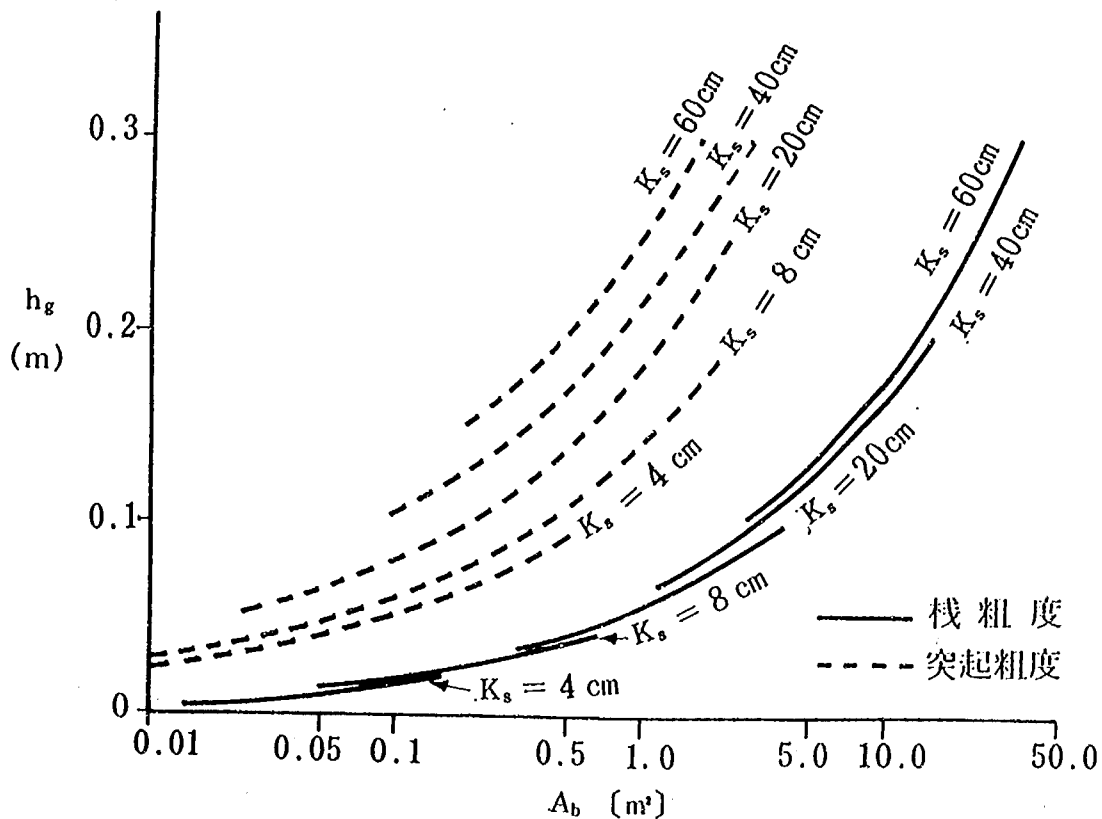


図 7-10 K_s 一定の下での $h_g \sim A_b$ 関係

になる，すなわち (7-1) 式の関係が満たされる条件から決定する。この時，滑動が起きない範囲で最も小さい d を求める意味で (7-1) 式の左右辺が等しくなる条件を用いる。 d の計算に当たっては，極限状態と通常状態 2 つの方法を用いる。

以上の考え方によって，設計流速 V_d ，必要とされる相当粗度 K_s と A_b ， h_g ， d との関係が得られる。図 7-11，7-12 は， A_b と d との関係を種々の V_d ， K_s について示したものである。なお，これらの図を計算するに当たって必要となるブロックに作用する抗力と揚力は次のように計算した。抗力については，図 7-9 のブロックの C_D 値にブロック A の C_D 値を用いても大きな誤差を生じないと考えて，この C_D と図 7-9 のブロックの投影面積から計算した。揚力については， A_b の面積が大きくなると揚力に関する投影面積が大きくなるが，それに伴ってブロックの形状が偏平になるため揚力はそれほど増えない。種々の形状を有するブロックの C_L については十分明らかにされていないので，計算ではブロック A の C_L を用いることとするが，揚力が作用する領域を突起及びその周辺だけと仮定（粗度高さの 3 倍を 1 辺とする正方形の面積を揚力に関する投影面積とする）し，この条件の下に揚力を計算した。図より次のことがわかる。まず，一定の V_d ， K_s の下では， A_b が小さくなるほど d が大きくなる。これは，ブロック一個の面積を小さくするほどブロック下部の厚さを大きくする必要があることを示している。また，図中の○印で示したように， K_s の値に対応して A_b の下限値が存在する場合が多い。これは，必要な K_s を確保するために A_b を一定以上大きくする必要があるからである。極限状態設計法を用いた場合の突起粗度については， A_b が減少すると d が急激に大きくなる

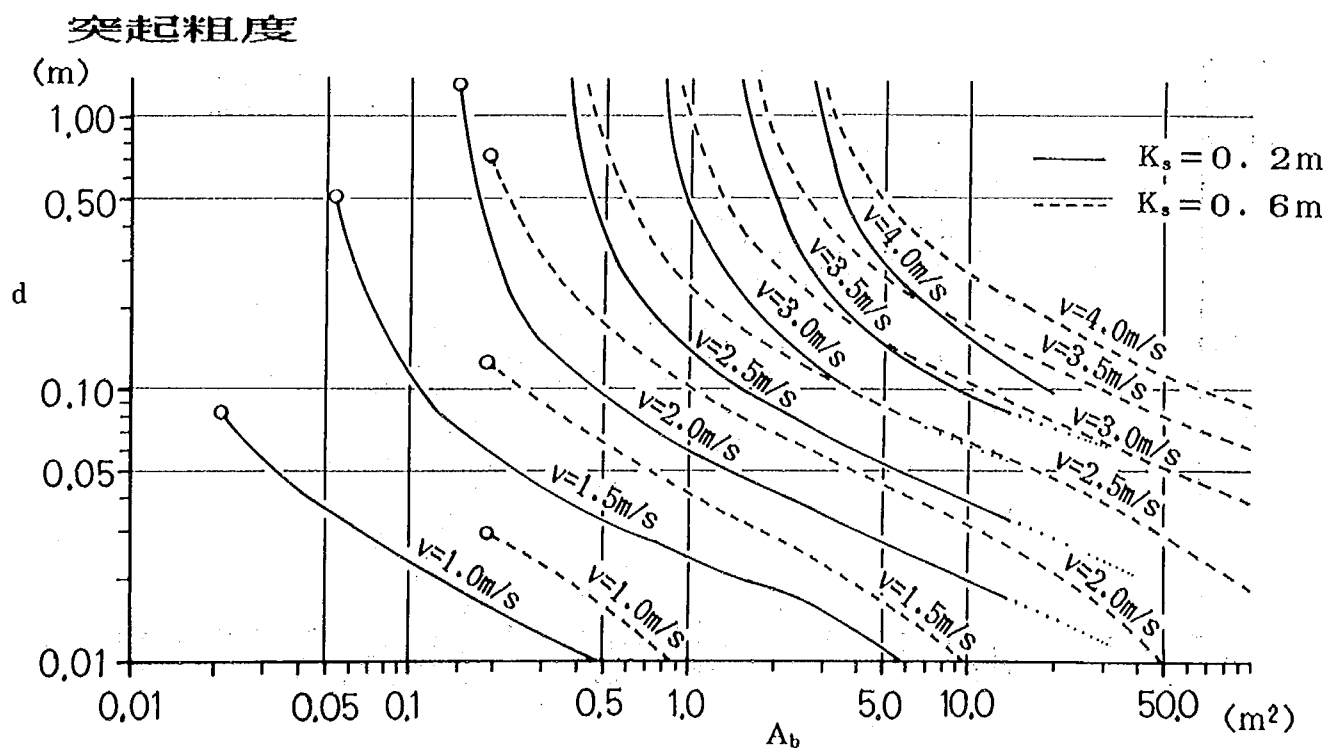
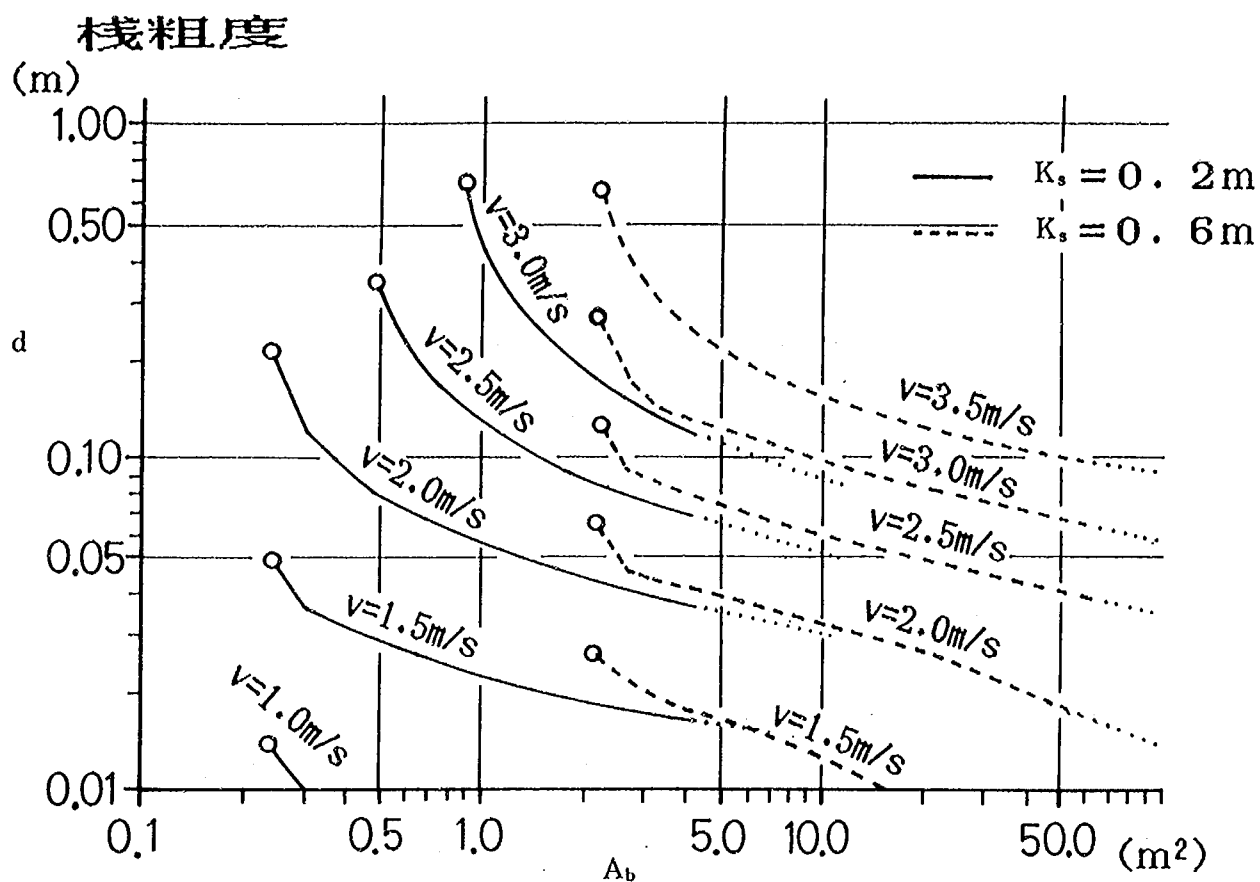


図 7 - 11 $A_b \sim d$ 関係 (極限状態設計法による)
 〈○は所定の K_s が得られる A_b の下限値を示す〉

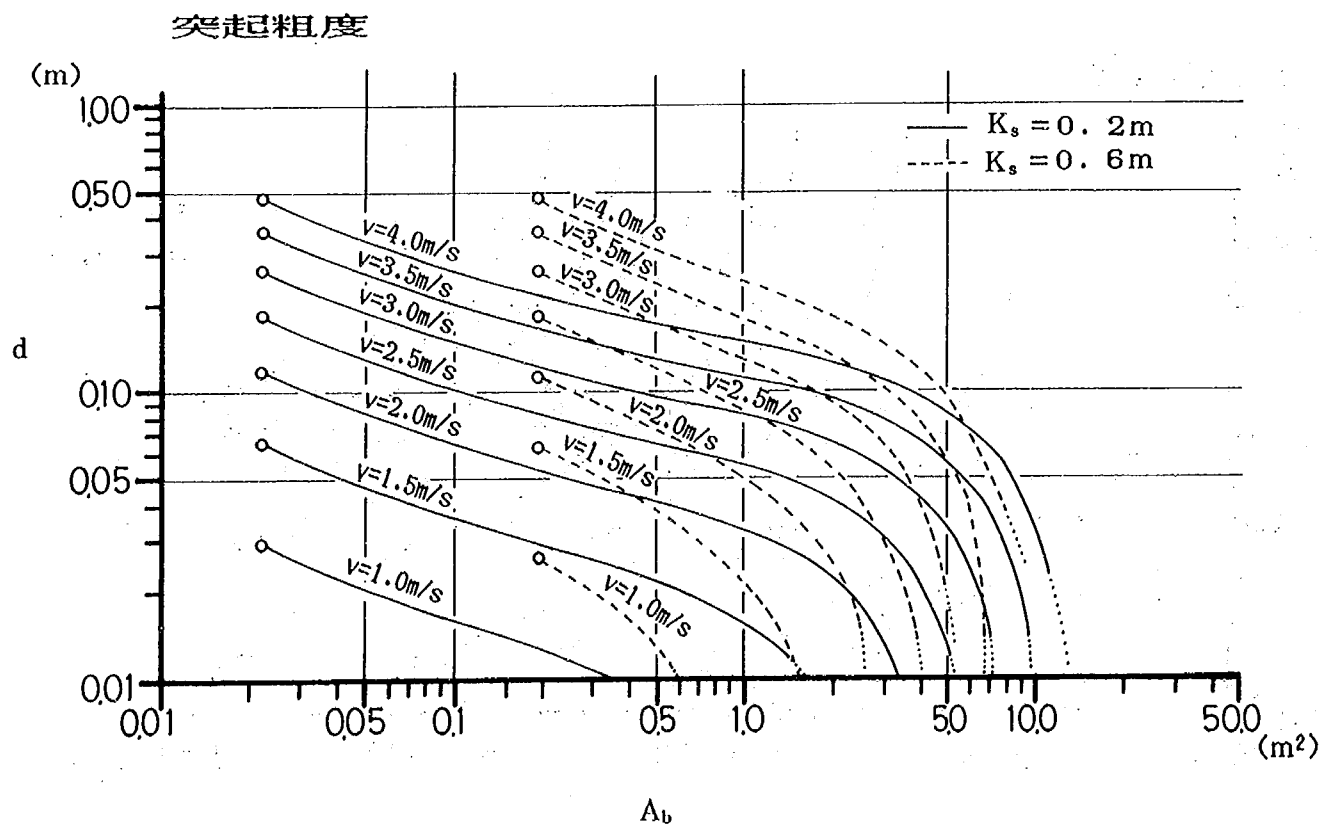
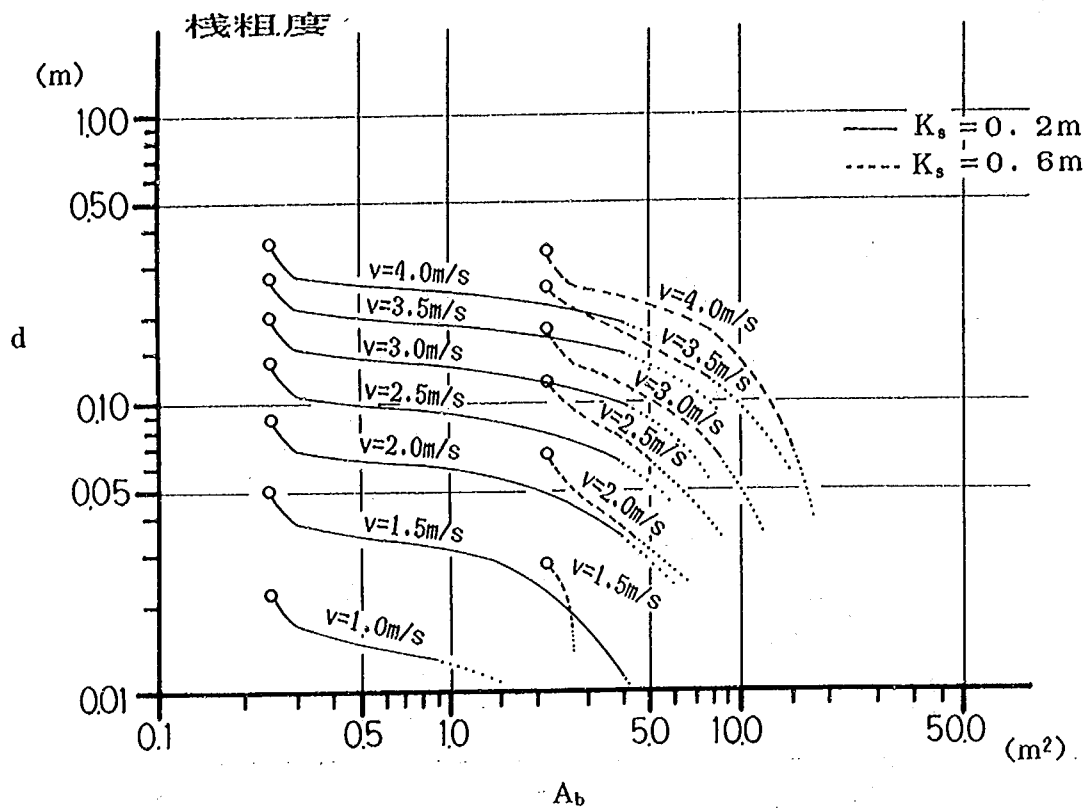


図 7 - 12 $A_b \sim d$ 関係 (通常状態設計法による)
 < ○は所定の K_s が得られる A_b の下限値を示す >

場合がある。 d は単位面積当りの必要コンクリート体積に比例し、経済性や施工性の面からブロック下部の厚さを一定値以上に大きくすることは実際上好ましくない。したがって、 d が急激に増大する時の A_b よりもブロック一個の面積を大きくする必要がある。 V_d 、 K_s が大きくなると $A_b \sim d$ 関係を表わす曲線が右に移動する。このことは、流速や必要相当粗度が大きくなると、 A_b あるいは d を大きくする必要があることを意味する。

7.4.2 法覆工ブロックの設計

図7-11、7-12を用いることによって、法覆工に用いるべきブロック諸元を知ることができる。すなわち、与えられた V_d と K_s に対応する $A_b \sim d$ 関係から、経済性、施工性等を考慮して、望ましい A_b と d を選択する。 d を小さくするほど必要コンクリート体積が小さくなるので、一般には d が小さくなるような設計を行うべきであるが、 d を小さくすると A_b が大きくなることにも留意する。また、選択した A_b に応じて、図7-10から突起高さ h_g を求める。以上の手順によって、用いるべきブロックの諸元を決定することができる。なお、 V_d あるいは K_s が大きくなる場合には、 A_b を小さくすることができず、ブロック一個の重量が非常に大きくなることが起こり得る。このような場合には、現場打ちコンクリートによる施工が望ましいと判断することになる。また、 d を小さくしすぎると、ブロック強度の面から問題となるので、図7-11、7-12からは小さな d を用いて良いと判断できる場合でも、実際には、強度あるいは施工上問題のない d を確保する。

第 8 章 ま と め と 今 後 の 課 題

本研究では、まず風洞実験により護岸ブロックに作用する流体力の特性を調べた。その結果、流水により護岸ブロックに作用する力を予測するために必要な抗力係数、揚力係数、横力係数とブロックの諸元、配列状態との関係が得られた(3章)。この結果を用いて流水中に置かれた護岸ブロックの安定性に関する検討を行なったところ、安定性を判定する上で揚力の効果を見捨てることのできないこと、ブロックが流水中で安定かどうかは転動の有無ではなく滑動の有無により決まることが明らかとなった。これらのことから、流水中で安定なブロックの設計を行なうに当たっては、抗力だけでなく揚力を考慮し、滑動発生の有無を判断の基準にすれば良いことがわかった(4章)。また、護岸法覆工表面の粗度形状と護岸工近傍の流速低減効果との関係を調べ、設計の対象となりうる効率の良い流速低減効果を持つ粗度形状を明らかにした(5章)。以上の成果を総合して、護岸法覆工の設計法について検討を行なった。まず、護岸設計を行なう際に用いる外力として護岸法覆工近傍の流速とそこに作用するせん断力を取上げ、それらを護岸設計法に用いることができる程度の精度で簡便に求める方法を示した(6章)。また、護岸法覆工設計の目標として、適度な流速低減効果を持つことと、流水中で安定であることを設定し、それぞれの目標に適合する護岸法覆工諸元の設計法を提案した。これらのうち流水中での安定性に関しては、通常状態設計法と極限状態設計法という安全度についての考え方の異なる2つの方法を提示した。最後に、以上の成果から、適度な流速低減効果を持ち、かつ流水中で安定である護岸法覆工の諸元と設計流速、流速低減効果の目安である相当粗度との関係を示した。この結果は、護岸法覆工の諸元を設計する上でのわかりやすい目安となる。

本研究は、護岸下の地盤の吸出し特性や護岸ブロック同士の連結効果など検討していない問題をいくつか残している。また、護岸法覆工の破壊機構や流体力の変動特性など現地での観測を通してさらに明確にすべき問題がある。これらについて調査を積み重ね本設計法を改良することにより、合理的かつ実用的な護岸設計法を完成させていくことが重要である。

〈謝辞〉

本研究は、水理的根拠に基づく合理的な設計法開発の必要性についての近藤徹河川局治水課長（当時）の指摘を契機として始められ、研究の方向性についても数々の貴重な意見をいただいた。また、護岸工の設計に際しての技術的な考え方について齊藤尚久河川局治水課長のご意見をいただき、とりまとめた。ここに、記して深甚の謝意を表します。

〈参考文献〉

- 1) 例えば吉川秀夫：改訂河川工学，朝倉書店，1980.
- 2) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準（案），設計編，山海堂，昭和60年
- 3) 河川管理施設等構造令研究会編：解説河川管理施設等構造令：山海堂，昭和53年3月
- 4) 建設省河川局：護岸・根固め工設計指針（案）
- 5) 福岡捷二・藤田光一・森田克史：護岸法覆工の水理特性に関する研究，土木技術資料，第30巻，3号，1988.
- 6) 福岡捷二・藤田光一・森田克史：護岸工の水理設計，土木技術資料，第30巻，3号，1988.
- 7) 城・植松・藤崎・吉川：粗度近傍の流れと流体力に関する実験的研究，第31回水理講演会論文集，1987.
- 8) 秋草・吉川・坂上・芦田・土屋：水制に関する研究，土木研究所報告，第107号，昭和35年10月
- 9) 小川・竹本・大石・村端：護岸法覆工の水理学的研究，北海道開発局土木試験所月報，第213号，1971.
- 10) Powell, R. W: Flow in a channel of definite roughness, Trans. A.S.C.E., Vol. 111, 1946, pp 531 ~ 566
- 11) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集，第104号，昭和39年4月
- 12) 土木学会：水理公式集，昭和60年版，pp 271
- 13) Schlichting: Boundary Layer Theory, McGraw-hill, 1955.
- 14) 建設省河川局監修：改訂建設省河川砂防技術基準（案）調査編，第6章，山海堂，昭和52年
- 15) 山本晃一：沖積地河川の河道特性に関する研究，土木研究所報告第168号，1986.
- 16) 建設省河川局治水課，土木研究所河川研究室：河道特性に関する研究，第40回建設省技術研究会報告，pp 601, 1986.
- 17) Chow, V. T.: Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill, pp. 185, 1959.
- 18) 吉川秀夫：改訂河川工学，朝倉書店，pp. 211, 1980.
- 19) B. Z. Kinori and J. Mevorach: Manual of Surface Drainage Engineering, Vol. II

(Developments in Civil Engineering , 8), Stream Flow Engineering and Flood Protection , ELSEVIER , 1984.

護岸法覆工の水理設計法に
関する研究

I S S N 0 3 8 6 - 5 8 7 8
土木研究所資料第 2635 号
昭和 63 年 (1 9 8 8)
福岡 捷 二 , 藤 田 光 一
森 田 克 史

キーワード : 護岸工, 法覆工, 河川構造物, 水理設計法, 流体力, 相当粗度

要 旨 風洞実験により, 洪水時に護岸法覆工に作用する力と法覆工表面近傍の流速を調べ, その結果より, 護岸法覆工形状・流速と護岸法覆工に作用する力との関係, 法覆工表面の粗度形状と流速低減効果との一般的な関係を明らかにした。その結果に基づき, 流水中において安定であり, かつ適度な流速低減効果を持つ護岸法覆工を設計する方法を提案した。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

河川研究室

御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 2635号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印